



Casa abierta al tiempo

Universidad Autónoma Metropolitana
Unidad Azcapotzalco

DIVISIÓN DE CIENCIAS BÁSICAS E INGENIERÍA
POSGRADO EN INGENIERÍA ESTRUCTURAL

DESARROLLO DE UNA MAMPOSTERÍA
SUSTENTABLE A PARTIR DE SUELO
ESTABILIZADO PARA VIVIENDA RURAL
EN ZONA DE BAJA SISMICIDAD

T E S I S
QUE PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRO EN INGENIERÍA ESTRUCTURAL
P R E S E N T A

JOSÉ TRÁNSITO PINTOR PALACIOS

DIRECTOR DE TESIS: DR. DANNY ARROYO
ESPINOZA

CIUDAD DE MÉXICO
2018

AGRADECIMIENTOS

Me veo forzado a hacer estos agradecimientos, no porque nadie lo merezca, al contrario, la lista es interminable, y es virtualmente imposible mencionar a todas las personas que me han ayudado. Por esta razón, pido una sincera disculpa a todo aquél que se sienta omitido en ellos.

Ante todo agradezco a mis padres Tránsito y Georgina, por darme más de lo que necesité, y por inculcar en mí: el pundonor, y el amor a la libertad. Su ejemplo como trabajadores incansables, poseedores de una voluntad férrea, me ha servido de guía en todo momento, me siento muy orgulloso y agradecido de ser su hijo. A Franco (QEPD), le agradezco ser lo que soy; también agradezco a mis hermanos Georgina, Rocío, Wendy, Yazmín y Jair por estar ahí siempre que los he necesitado, especialmente a Maribel, quien se tomó el tiempo para dar la opinión preliminar de la redacción de este documento, a excepción de esta página.

A mis hijos, Rubén y Renata, les agradezco por ser el motivo de mi esfuerzo y por brindarme el cariño necesario en los momentos más difíciles; por supuesto a mi compañera, Samanta, más que agradecerle quiero reconocer la gran labor de ser el apoyo incondicional y el obstáculo más grande al mismo tiempo, en ambos casos con la mejor intención, siempre, un gran ser humano que sigue a mi lado a pesar de mí.

Al Dr. Gustavo Carbajal Aguilar le agradezco el gran ejemplo de dedicación a la profesión que se ha elegido, un gran padre y amigo. Al Dr. Carlos Ulín le agradezco la paciencia que me tuvo cuando creí que no iba a ser posible terminar la carrera, y en realidad apenas había iniciado, siempre voy a valorar esas palabras de apoyo.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) le agradezco el haberme otorgado la beca que me permitió realizar los estudios de maestría.

Agradezco a todo el equipo de la Universidad Autónoma Metropolitana que de alguna manera contribuyó al desarrollo de este trabajo, especialmente a los técnicos del Laboratorio de Estructuras, a quienes considero mis amigos, Juan Mateos, José Luis Caballero y Rubén Barrera; siempre ofrecieron su tiempo y esfuerzo desinteresadamente e hicieron placenteras esas horas de trabajo en el laboratorio.

Agradezco a los Jefes del Área de Estructuras y del Departamento de Materiales por brindarme las facilidades para llevar a cabo este estudio, así como a los profesores del Posgrado en Ingeniería Estructural por su gran labor.

Por supuesto agradezco a mis sinodales, la Dra. Consuelo Gómez Soberón, el Dr. Dante Tolentino López y el Dr. Gelacio Juárez Luna por el tiempo dedicado a la revisión de este documento.

Finalmente quiero agradecer la paciencia y la valiosa asesoría durante el desarrollo de este trabajo al Dr. Danny Arroyo Espinoza.

CONTENIDO

RESUMEN	V
---------------	---

ÍNDICE DE TABLAS.....	VII
-----------------------	-----

ÍNDICE DE FIGURAS	IX
-------------------------	----

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes	1.1
1.2 Objetivo General	1.7
1.3 Objetivos específicos	1.7
1.4 Metodología.....	1.8
1.5 Organización de la tesis	1.9

CAPÍTULO 2. MEZCLA

2.1 Antecedentes	2.1
2.2 Selección de mezclas.....	2.3
2.3 Localización del banco potencial	2.4
2.4 Evaluación del suelo.....	2.5
2.5 Fabricación de CINVA-RAM y prensa para cubos	2.7
2.6 Inclusión de fibras de refuerzo	2.8
2.7 Cubos.....	2.10
2.7.1 Resistencia a compresión en cubos	2.10
2.7.2 Durabilidad de cubos	2.12
2.8 Bloques	2.14
2.8.1 Resistencia a compresión en bloques.....	2.14
2.8.2 Durabilidad en bloques.....	2.16
2.9 Bloques con suelo triturado.....	2.17
2.9.1 Resistencia a compresión en bloques de suelo triturado-cemento	2.18
2.9.2 Durabilidad de bloques de suelo triturado-cemento	2.19
2.10 Resultados.....	2.19

CAPÍTULO 3. ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA

3.1 Antecedentes	3.1
3.2 Análisis de Ciclo de Vida.....	3.3
3.2.1 Análisis de los cubos suelo-cemento	3.4
3.2.2 Evaluación de las piezas de barro cocido con perforaciones	3.5
3.2.3 Evaluación de los bloques de concreto	3.7
3.3 Resultados.....	3.8

CAPÍTULO 4. PROPIEDADES MECÁNICAS

4.1 Antecedentes	4.1
4.2 Fabricación de especímenes de prueba	4.3
4.3 Descripción de las pruebas	4.5
4.4 Resultados.....	4.6
4.4.1 Resistencia de diseño a compresión del mortero f_j^*	4.6
4.4.2 Resistencia de diseño a compresión de las piezas f_p^*	4.7
4.4.3 Resistencia de diseño a compresión de la mampostería f_m^*	4.8
4.4.4 Resistencia de diseño a compresión diagonal de la mampostería v_m^*	4.10

CAPÍTULO 5. ENSAYE DE MURO

5.1 Antecedentes	5.1
5.2 Fabricación de marco de carga	5.3
5.3 Fabricación del muro	5.4
5.4 Descripción de las pruebas	5.7
5.5 Resultados.....	5.7
5.5.1 Resistencia de diseño a compresión de testigos de concreto f_c'	5.7
5.5.2 Prueba del muro ante cargas laterales	5.8

CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES

RESUMEN

A partir del año 1952, gracias a la invención de la CINVA-RAM (prensa mecánica diseñada con la intención de mejorar las propiedades del adobe, nombrada así por el Centro Interamericano de Vivienda en Bogotá, Colombia y por el apellido de su diseñador, el ingeniero chileno Raúl Ramírez), los bloques de suelo comprimido adquieren un valor agregado a nivel mundial, generando un mercado genuino para su producción y aplicación, ya que, ofrecen una alternativa para cubrir las crecientes necesidades de vivienda; sin embargo, en países como Argentina, la construcción con adobe no es permitida, debido a que no presenta un desempeño sísmico adecuado, y es que en este tipo de construcciones generalmente no están involucrados ingenieros y arquitectos.

Además de las bondades económicas y ambientales, los bloques de suelo estabilizado han demostrado ser un material que posee suficiente flexibilidad en su producción: pueden ser elaborados de manera artesanal o bajo un proceso totalmente industrializado, y desde su origen han sido motivo de innumerables investigaciones, aunque no suficientes. Para ampliar el conocimiento de este material en la construcción de vivienda, en este estudio se llevaron a cabo pruebas de resistencia a compresión y de durabilidad para bloques suelo-cemento utilizando diferentes mezclas. Se realizaron también ensayos a compresión en pilas y muretes (compresión diagonal), y finalmente, se evaluó el comportamiento de un muro escala 1:1 ante cargas laterales.

El muro fue sometido a prueba a manera de primer alcance, con el propósito de obtener datos que determinen la factibilidad de establecer el ensaye de varios muros bajo el protocolo de carga establecido en el Apéndice A de las Normas Técnicas para Diseño y Construcción de Estructuras de Mampostería (NTCM-2004), primero ante cargas y posteriormente a deformaciones, sistemáticamente.

La metodología que se siguió se describe a continuación, cada apartado se describe adecuadamente en el capítulo correspondiente.

- a) Se localizó una población con un posible suelo adecuado para la fabricación de los bloques.
- b) Se evaluaron las características del suelo y se consideraron apropiadas para producir bloques de mampostería.
- c) Se evaluó la utilización de fibras de agave y de coco para mejorar las cualidades de la mampostería.
- d) Se fabricó una máquina CINVA-RAM y una prensa manual para fabricar cubos de 5cm por lado y los bloques de mampostería.
- e) Se desarrolló una mezcla de suelo con cemento o cal como material estabilizador, incluyendo además las fibras naturales.
- f) Se estudió el comportamiento tanto físico como mecánico de cubos de 5cm por lado y de bloques de 12x15x32cm para cada dosificación.

- g) Se compararon las propiedades mecánicas y físicas, así como, de costos ambientales, entre este tipo de mampostería y la mampostería tradicional.
- h) Se elaboraron pilas y muretes con los bloques definitivos para evaluar sus resistencias a compresión simple y a compresión diagonal, respectivamente.
- i) Se construyó un muro confinado de 2 x 2 m, para someterlo a una prueba por cortante, incluyendo carga axial.
- j) Se fabricó un dispositivo para aplicar las cargas lateral y axial al muro.
- k) Se llevó a cabo la prueba del muro ante cargas laterales, que fue sometido simultáneamente a una carga axial, simulando la carga gravitacional.

En resumen, los bloques comprimidos presentaron propiedades adecuadas para la construcción de vivienda en zona de baja sismicidad, principalmente por conservar la integridad ante una carga lateral. El resultado del estudio no es determinante, por el contrario, requiere la realización de estudios posteriores para conocer mejor las propiedades de este tipo de mampostería.

ÍNDICE DE TABLAS

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

Tabla 1.1	Valores de CO ₂ -e en kg por tonelada producida de algunos materiales comunes en la construcción de acuerdo a distintos autores
-----------	--

CAPÍTULO 2. MEZCLA

Tabla 2.1	Pesos volumétricos saturado y seco del suelo
Tabla 2.2	Resultados de las pruebas a compresión de cubos suelo-cemento-fibra
Tabla 2.3	Resultados de las pruebas a compresión de cubos suelo-cal
Tabla 2.4	Resultados de las pruebas de durabilidad en cubos suelo-cemento-fibra
Tabla 2.5	Resumen de resultados de las pruebas en cubos
Tabla 2.6	Esfuerzos a compresión para bloques suelo-cemento
Tabla 2.7	Esfuerzos a compresión para bloques suelo-cemento-fibra
Tabla 2.8	Resultados de las pruebas de durabilidad en bloques suelo-cemento-fibra
Tabla 2.9	Resumen de resultados para cubos y bloques suelo-cemento-fibra
Tabla 2.10	Esfuerzos a compresión para bloques suelo triturado-cemento
Tabla 2.11	Resultados de las pruebas de durabilidad en bloques suelo triturado-cemento
Tabla 2.12	Resumen de resultados para cubos y bloques suelo-cemento y bloques suelo-cemento triturado

CAPÍTULO 3. ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA

Tabla 3.1	Valores de CO ₂ -e en kg por tonelada producida de cemento
Tabla 3.2	Valores de CO ₂ -e en kg por tonelada producida de block cerámico
Tabla 3.3	Valores de CO ₂ -e en kg por tonelada producida de block de concreto
Tabla 3.4	Resumen de valores

CAPÍTULO 4. PROPIEDADES MECÁNICAS

Tabla 4.1	Esfuerzos a compresión para cubos de mortero
Tabla 4.2	Esfuerzos a compresión para bloques suelo-cemento
Tabla 4.3	Resultado de las pruebas a compresión en pilas
Tabla 4.4	Resistencia de diseño a compresión de la mampostería, f_m^* , para algunos tipos de piezas, sobre área bruta
Tabla 4.5	Resultado de las pruebas a compresión diagonal en muretes
Tabla 4.6	Resistencia de diseño a compresión diagonal para algunos tipos de mampostería sobre área bruta

CAPÍTULO 5. ENSAYE DE MURO

Tabla 5.1	Resistencia a compresión en testigos de concreto
Tabla 5.2	Estados límite para muros de mampostería confinada

ÍNDICE DE FIGURAS

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

- Figura 1.1 Casa tipo Bhonga tradicional en algunas regiones de India
- Figura 1.2 Aparato del arquitecto Francois Cointeraux para comprimir bloques de tierra
- Figura 1.3 Máquina CINVA-RAM

CAPÍTULO 2. MEZCLA

- Figura 2.1 Fibra de agave utilizada como refuerzo de los bloques
- Figura 2.2 Panorama del banco potencial
- Figura 2.3 Muestreo del suelo
- Figura 2.4 Equipo de cribado
- Figura 2.5 Prueba y curva de granulometría para el suelo de estudio
- Figura 2.6 Prueba Proctor
- Figura 2.7 Prensa para la fabricación de cubos
- Figura 2.8 Tratamiento de las fibras con cal
- Figura 2.9 Tratamiento de las fibras con sellador para madera
- Figura 2.10 Prueba de durabilidad en cubos
- Figura 2.11 Pruebas de compresión para cubos
- Figura 2.12 Pruebas de compresión en bloques
- Figura 2.13 Comparativo entre la curva granulométrica sugerida, la granulometría del suelo original y la granulometría del suelo triturado

CAPÍTULO 3. ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA

- Figura 3.1 Diagrama de flujo para la fabricación de bloques suelo-cemento
- Figura 3.2 Diagrama de flujo para la fabricación de piezas de barro cocido con perforaciones
- Figura 3.3 Diagrama de flujo para la fabricación de bloques de concreto

CAPÍTULO 4. PROPIEDADES MECÁNICAS

- Figura 4.1 (a) Prisma sujeto a una fuerza vertical de compresión
(b) Estados de esfuerzo para las piezas y el mortero
- Figura 4.2 Escarificación de las piezas
- Figura 4.3 Elaboración de pilas y muretes
- Figura 4.4 Prueba a compresión de pilas
- Figura 4.5 Prueba a compresión diagonal en muretes

CAPÍTULO 5. ENSAYE DE MURO

- Figura 5.1 Transmisión de las fuerzas inerciales inducidas por el sismo
- Figura 5.2 Tipos de falla en muros a cortante.
a) y b) Falla por deslizamiento (Tomazevic, 1999).
c) Falla por tensión diagonal (Crisafuli, 1997).
d) Falla por compresión en las esquinas (Crisafuli, 1997)
- Figura 5.3 Distribución de cargas en muros a cortante
- Figura 5.4 Marco de carga típico para pruebas de muros a cortante
- Figura 5.5 Marco de carga utilizado en el estudio
- Figura 5.6 Losa de piso
- Figura 5.7 Instrumentación del armado
- Figura 5.8 Construcción del muro
- Figura 5.9 Colado de losa
- Figura 5.10 Colocación de cuadrícula en muro
- Figura 5.11 Arreglo final para la prueba
- Figura 5.12 Agrietamiento después del primer desplazamiento
- Figura 5.13 Agrietamiento final

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes

En las últimas décadas ha ido en aumento una preocupación general respecto a las condiciones ambientales. El calentamiento global y sus efectos potenciales en el planeta son producidos por la acumulación de gases de tipo invernadero en la atmósfera (Nordhaus, 1991; Pearce, 2003; Asif *et al.*, 2007); dentro de las actividades humanas que más han contribuido en la emisión de este tipo de gases destaca el sector de la construcción (Buchanan y Honey 1994, Venkatarama y Jagadish 2003, Dimoudi y Tompa 2008), se estima que representa el 22% de la emisión total en India (Venkatarama, 2004) y la literatura indica que en algunos casos este sector llega a consumir entre 30 y 50% de la energía en los países más industrializados (Huberman y Pearlmuter, 2004).

La energía consumida por las edificaciones se divide en tres grandes rubros: la fase de producción que implica extracción, producción, transportación y el proceso constructivo; la vida útil que implica la iluminación y el aire acondicionado y, finalmente, la etapa posterior a la vida útil, en la que se involucran las energías de demolición, transporte y la posible reutilización o el reciclado. La energía de la fase de producción generalmente se considera pequeña al compararla con la utilizada durante la vida útil; sin embargo, algunas investigaciones han demostrado que puede representar hasta un 50% del total de la energía en un edificio típico.

Los principales gases producidos en la industria de la construcción son: dióxido de carbono (CO₂), monóxido de carbono (CO), dióxido de azufre (SO₂), y monóxido de nitrógeno (NO) (Jönsson *et al.*, 1998). Las emisiones de CO₂ ocurren tanto por la producción de cemento como por la quema de combustibles fósiles, mientras el resto de los gases se relacionan principalmente con el consumo de energía. Los gases tipo invernadero se acumulan en la capa superior de la atmósfera terrestre dado que se disipan muy lentamente y son los causantes de un incremento de temperatura en el planeta.

Por lo tanto, la sustentabilidad de un proceso se mide con base en la cantidad de emisiones de gases de efecto invernadero que se producen durante el mismo. Normalmente, para poder cuantificar las emisiones de gases invernadero de un proceso específico todos los gases se transforman en una emisión equivalente de CO₂ (CO₂-e). La estimación de las emisiones CO₂-e se obtienen a través de un estudio conocido como Análisis Ciclo de Vida (LCA por sus siglas en inglés) (US EPA/600, 2006) en el cual se determina una estimación de la cantidad de CO₂-e que se emitirá a la atmósfera como consecuencia de las actividades del proceso analizado.

En la tabla 1.1 se presentan valores de CO₂-e en kg por tonelada de producción para materiales usualmente empleados en la construcción de acuerdo a distintas referencias. Se observa una dispersión importante debido a factores que dependen de las fronteras establecidas para el

sistema, es decir, algunos análisis pueden incluir el proceso completo, desde la producción hasta el empaque del producto.

Otros factores que contribuyen a dicha dispersión pueden estar relacionados con las diferencias en los procesos de producción en diferentes países. Por estas razones resulta recomendable que el sistema esté acotado por el objetivo del análisis y por la información que requiere el usuario.

Tabla 1.1. Valores de CO₂-e en kg por tonelada producida de algunos materiales comunes en la construcción de acuerdo a distintos autores.

Material	Referencia	Kg CO ₂ -e/ton
Concreto	Buchanan y Honey (1994)	76
	Penttala (1997)	147
	González y García (2006)	19
	Gustavsson y Sathre (2006)	11
	Asif <i>et al.</i> , (2007)	123
	Flower y Sanjayan (2007)	120
	Yan <i>et al.</i> , (2010)	170
	Zabalza <i>et al.</i> , (2011)	179
	Monahan y Powell (2011)	174
Acero	Buchanan y Honey (1994)	1070
	Gustavsson y Sathre (2006)	35
	González y García (2006)	516
	Yan <i>et al.</i> , (2010)	377
	Monahan y Powell (2011)	3809
Vidrio	Penttala (1997)	2100
	González y García (2006)	257
	Asif <i>et al.</i> , (2007)	568
	Yan <i>et al.</i> , (2010)	1858
Tablaroca	Gustavsson y Sathre (2006)	82
	González y García (2006)	99
	Asif <i>et al.</i> , (2007)	265
Ladrillo cerámico	González y García (2006)	40
	Monahan y Powell (2011)	519
	Zabalza <i>et al.</i> , (2011)	271
Madera	Buchanan y Honey (1994)	44
	Penttala (1997)	124
	Gustavsson y Sathre (2006)	14
	Hacker <i>et al.</i> , (2008)	400
	Zabalza <i>et al.</i> , (2011)	300
	Asif <i>et al.</i> , (2007)	116

Para el presente estudio se estimarán las cantidades de CO₂-e emitidos durante el proceso de producción de los bloques para establecer el impacto ambiental potencial de dichas emisiones. De manera preferente se incluirán los resultados publicados en revistas científicas con arbitraje riguroso.

Una vez que se cuantifica el volumen de emisiones, el costo ambiental se obtiene mediante el impuesto por tonelada emitida de CO₂-e. Existe una gran incertidumbre en este valor debido a los factores que se enlistan a continuación:

- a) Algunos estudios utilizan el enfoque costo-beneficio, mientras otros usan como parámetro el daño marginal (el valor es establecido al estimar la diferencia en niveles de daño futuro causados por un cambio marginal en los niveles de emisión actuales) (Clarkson y Deyes, 2002).
- b) Se ha identificado que los países en vías de desarrollo son más vulnerables al calentamiento global, a diferencia de los países desarrollados, porque existen más actividades sensibles al clima en su economía (Clarkson y Deyes, 2002; Pearce, 2003; Tol, 2005). Por ello muchos estudios han usado el enfoque de igualdad de peso para agregar la valuación del impacto de calentamiento global en una zona geográfica (estos factores dependen del ingreso de la región).
- c) El valor del impuesto por emisiones de dióxido de carbono depende de la estrategia tomada por las naciones para controlar la emisión de gases tipo invernadero (Nordhaus y Yang, 1996). En el enfoque de políticas de cooperación los intereses ambientales globales son tratados en conjunto, en tanto que, fuera de este enfoque cada país establece sus propias políticas sin importar los efectos en otras naciones. Nordhaus y Yang (1996) reportan grandes valores para el impuesto por emisiones de dióxido de carbono cuyo se utiliza el enfoque cooperativo en el análisis costo-beneficio.
- d) El entendimiento actual de los detalles regionales que fortalecen el impacto del cambio climático está incompleto y los modelos de cambio climático actuales usan resoluciones temporales y espaciales burdas (Tol, 2005).

En 1992 dentro de una cumbre de las Naciones Unidas se publicó la Agenda 21, que subrayaba las seis áreas más importantes para un diseño sustentable. En su cuarta sección abordaba el tema de los asentamientos humanos y proponía el uso de materiales locales, la conservación de técnicas tradicionales de construcción, el mejoramiento de los materiales en países subdesarrollados, el apoyo a las comunidades humildes para la adquisición de bienes y servicios, la exploración de métodos que fomenten y faciliten el reciclado y la reutilización de los materiales de construcción, y el empleo de las llamadas “tecnologías limpias”.

Ryan (2011) establece un criterio para definir un material de construcción tradicional que ofrezca beneficios de salud y sustentabilidad, a saber:

- Limpios, no contener toxinas, no deben emitir vapores que indiquen un riesgo biológico, olores o partículas nocivas, ni en la fabricación ni en el uso.
- Resistentes a las bacterias y virus.
- Su fabricación no deben producir ruido excesivo, y en su etapa útil deben aislarlo adecuadamente.
- No deben ser radiactivos.
- Dieléctricos.
- Renovables y abundantes, por lo que deben provenir de fuentes naturales y su producción debe tener un bajo impacto en el ambiente.
- Energéticamente eficientes, desde su producción, transportación y uso, manteniendo ambientes térmicos agradables sin necesidad de utilizar aire acondicionado.
- Durables y fáciles de mantener y reparar.
- Producidos con objetivos sociales, creación de fuentes de empleos en zonas de bajos recursos.
- Con una baja producción de desechos y una alta capacidad de ser reciclados, lo que implica un ahorro de energía en el proceso de materiales de desecho.

Materiales como el cemento, el acero, el vidrio, el aluminio, los plásticos y los ladrillos, entre otros, son comunes en la construcción y requieren una gran cantidad de energía para ser producidos, sin mencionar que generalmente se trasladan a grandes distancias de las plantas de producción, factor que incrementa diversos efectos contaminantes relacionados al sector constructivo.

El suelo natural, en cambio, posee muchas de las cualidades antes citadas, sobre todo en el proceso de producción pues no genera ruido importante a menos que se lleve a cabo en gran escala, con maquinaria pesada, además de ser un material que siempre está disponible, lo cual lo convierte en renovable y abundante; sin embargo, resultaría imposible solventar un desarrollo con materiales como: el suelo, la madera y otros recursos naturales, por lo que, es necesario optimizar los recursos disponibles ejerciendo el menor daño posible al medio ambiente.

Los orígenes de la construcción con base en suelo datan del siglo VIII a.c. (Houben y Guillard 1994), en la región de la India se encontraron indicios de las primeras construcciones con bloques de suelo moldeados o adobes, cuya utilización está relacionada a la evolución de la humanidad con la revolución agrícola y más adelante a la revolución urbana. Con el desarrollo de las ciudades, el uso del adobe estaba intrínsecamente relacionado con el progreso arquitectónico, permitiendo la construcción de templos y palacios, multiplicando los asentamientos humanos.

En la actualidad el adobe se utiliza principalmente en zonas rurales, con casas que generalmente consisten de una planta y muros que van de 0.25 a 0.85 m de espesor (Blondet, Villa y Brzev, 2011), incluso en relación con el clima, para zonas costeras se prefieren más esbeltos que en zonas montañosas frías o en el clima caliente del desierto. Las casas urbanas de adobe se encuentran principalmente en países en desarrollo, aunque algunos códigos de construcción no lo permiten debido al bajo desempeño sísmico que presentan.

En América Latina el adobe es utilizado generalmente por familias de bajos recursos, a diferencia de países como la India, donde se emplea tanto en lujosas residencias como en hogares humildes, aunque invariablemente la calidad de la construcción es mejor en las ciudades que en las zonas rurales.

Las características arquitectónicas que predominan en la mayoría de los países son: una planta rectangular, una puerta sencilla y pequeñas ventanas laterales, la cimentación se lleva a cabo con rocas unidas con mortero o lodo, los adobes se unen con mortero fabricado a partir del mismo suelo. Los techos usualmente se construyen con madera de la región y las cubiertas dependen de la situación económica y cultural de la misma. Una casa tradicional de adobe que exhibe buen comportamiento sísmico es el tipo Bhonga, típica de Gujarat, India, consiste en una forma cilíndrica con un techo cónico, cuenta con refuerzo de bambú o concreto en el dintel y en la unión con el techado, como se muestra en la figura 1.1.



Figura 1.1. Casa tipo Bhonga tradicional en algunas regiones de India , tomada de: <http://db.world-housing.net/building/72/>.

Los bloques de suelo comprimido son los descendientes directos del adobe y la idea de mejorar sus cualidades tampoco es nueva, los primeros bloques comprimidos se dieron mediante la compactación con pisones de madera, proceso que aún se utiliza en muchos lugares del mundo.

Una de las primeras máquinas para comprimir suelo fue inventada en Francia, era un aparato de madera basado en una prensa vinícola diseñado por el arquitecto Francois Cointeraux (ver figura 1.2), pero no fue hasta el siglo XX que se diseñaron las primeras prensas mecánicas, con pistones fuertes dentro de un molde, como las de la industria de ladrillos horneados, que comprime el suelo entre dos placas convergentes.

1952 marcó un hito en la historia de las prensas con la invención de la CINVA-RAM (Venkatarama y Gupta, 2004; Guillaud *et al.*, 1985), desde entonces la tecnología de producción de bloques de tierra comprimida y su aplicación continúa progresando a través del mundo. En la figura 1.3 se aprecia la CINVA-RAM fabricada para este estudio, que está basada en la propuesta original del Ingeniero Ramírez.

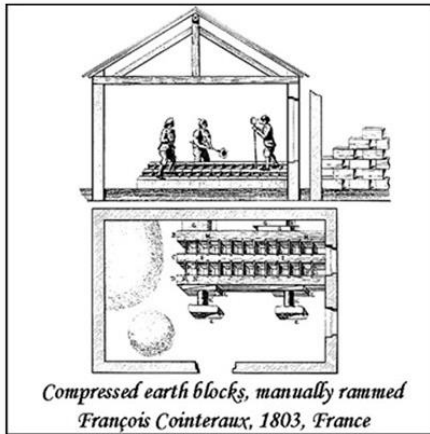


Figura 1.2. Aparato del arquitecto Francois Cointeraux para comprimir bloques de tierra, tomada de; http://www.earth-auroville.com/compressed_earth_blocks_en.php.



Figura 1.3. Máquina CINVA-RAM.

La máquina CINVA-RAM es de operación manual para la producción de bloques de mampostería que evitan el uso de piezas masivas, como ocurría con el adobe tradicional. La máquina consta de un molde rectangular, dentro del cual, se desliza el émbolo activado por una palanca para comprimir la mezcla suelo-aglutinante, cuando se activa la palanca en sentido inverso al de la compresión, el mismo pistón expulsa el bloque para poder retirarlo. El costo de la máquina es bajo, no fue patentada con el fin de que cualquiera pueda reproducirla, el mantenimiento es sencillo y su operación simple, tiene la capacidad de moldear los bloques a una presión de 20 kg/cm², y con la práctica adecuada se llegan a fabricar hasta unas 600 unidades en una jornada de 8 horas.

Las comparaciones entre las características y el desempeño de los bloques de suelo comprimidos y otras piezas de mampostería no deben limitarse a la resistencia a compresión o a la diferencia en costos de producción, el tema es mucho más complejo, se incluyen parámetros estéticos como la apariencia y las dimensiones; aspectos técnicos que incluyen el aislamiento térmico, la densidad, durabilidad, absorción y la permeabilidad; pero sobre todo los aspectos que involucra la producción como la disponibilidad y la energía necesaria (Guillaud *et al.*, 1985). Con esta forma de comparar los materiales se toma en cuenta de manera implícita la aplicación práctica y arquitectónica de la utilización de materiales del sitio.

El creciente interés por la utilización de este material ha motivado que organismos públicos y privados impulsen importantes investigaciones alrededor del mundo. La construcción con bloques obtenidos a partir de suelo representa hoy una alternativa potencial de desarrollo, especialmente en la producción de viviendas de interés social, en beneficio de un sector importante de la población, aquí radica la relevancia de mejorar e implementar este tipo de tecnología.

1.2 Objetivo general

El objetivo general de este trabajo es el evaluar la factibilidad del uso de bloques de suelo cemento para la construcción de edificaciones de pocos niveles como alternativa al uso de materiales tradicionales, considerando aspectos de comportamiento estructural y aspectos ambientales.

1.3 Objetivos específicos

Los objetivos específicos del trabajo son:

- Localizar una población cercana al Distrito Federal con un alto potencial de suelo adecuado que además requiera incentivar la economía local, mediante la generación de fuentes de empleo.
- Identificar un tipo de suelo que tenga las características apropiadas para producir bloques de mampostería que ofrezca propiedades físicas y mecánicas que cumplan con las normas de calidad.

- Evaluar la utilización de fibras de agave o de coco para mejorar las cualidades de la mampostería, mediante un tratamiento previo que consistirá en un lavado, sellado y cortado previo a su inclusión.
- Fabricar una máquina CINVA-RAM, así como una prensa manual que permita fabricar cubos de cinco centímetros por lado con una presión similar a la de la CINVA-RAM para evaluar y comparar los resultados en ambos tipos de espécimen.
- Desarrollar una mezcla de suelo con cemento o cal como material estabilizador, además de incluir fibras naturales, si resultan favorables, con el objetivo de mejorar la durabilidad y la impermeabilidad de la mampostería a fabricar.
- Estudiar el comportamiento tanto físico como mecánico de cubos de 5 cm por lado y de bloques de 12x15x32 cm para cada dosificación, hasta determinar aquella que presente las mejores cualidades.
- Comparar las propiedades mecánicas y físicas, así como de costos ambientales, entre este tipo de mampostería y la mampostería tradicional. La comparación incluirá el ciclo de vida total de la mampostería, desde su fabricación hasta su reutilización o reciclado.
- Elaborar pilas y muretes con los bloques definitivos para evaluar sus resistencias a compresión simple y a compresión diagonal, respectivamente.
- Construir un muro de 2 x 2 m, para someterlo a una prueba por cortante, incluyendo carga axial, confinado mediante elementos de concreto reciclado reforzado.
- Fabricar un dispositivo para aplicar las cargas lateral y axial al muro.

1.4 Metodología

a) Primera etapa. Ubicación del banco

Se localizó una región en el estado de Tlaxcala que proporciona un banco apropiado gracias a que se localiza en un territorio en que tradicionalmente se ha fabricado mampostería, se evaluaron las propiedades físicas del suelo y se compararon con los datos encontrados en la literatura.

b) Segunda etapa. Análisis de ciclo de vida, costos energéticos

Determinación de las fronteras del análisis. Se tomó como inicio del ciclo de vida la energía necesaria para la extracción del suelo, en cuanto al uso de máquinas y el traslado, tomando en cuenta que la producción de los bloques debe ser tan local como sea posible. A partir de tablas se incluye la energía necesaria para el material aglutinante, cal o cemento, con las restricciones pertinentes respecto al país productor y su economía, de manera que se tengan datos representativos y comparables a los nacionales. Es importante destacar que en este estudio no se incluyen las energías de empaque, transporte del producto final ni la de cocción de los bloques, por ser considerados innecesarios.

c) Tercera etapa. Evaluación de las características de la mezcla

Se evaluaron las características de la mezcla mediante pruebas de compresión y durabilidad en cubos de 5 cm por lado de suelo simple en una primera fase, de suelo-cemento para la segunda parte, en una tercera serie se incluyeron fibras de agave a la mezcla, posteriormente suelo cal y finalmente se modificó el suelo para alcanzar los requerimientos de resistencia que establecen las NTCM-2004. Se repitió el procedimiento en bloques de 12 x 15 x 32 cm. Todos los especímenes fueron fabricados con una compresión similar para establecer una comparación en los resultados.

d) Cuarta etapa. Evaluación de las propiedades índice

Para la mezcla definitiva se evaluaron la resistencia de diseño a compresión de la mampostería f_m^* , y la resistencia de diseño a compresión diagonal V_m^* de acuerdo a lo establecido en las normas mexicanas.

e) Quinta etapa. Evaluación del comportamiento del muro

En la etapa final se determinaron la resistencia y la capacidad de deformación de un muro confinado de 2x2m. Se fabricó un dispositivo de carga para tal efecto.

1.5 Organización de la tesis

En el capítulo dos se especifica la ubicación del banco y se define la mezcla utilizada en la fabricación de los bloques destinados a la construcción de pilas, muretes y muro, a partir de las alternativas encontradas en la literatura que fueron consideradas de interés, dadas las propiedades físicas del suelo, así como, la resistencia a compresión y durabilidad de bloques y cubos fabricados con estas mezclas.

El capítulo tres comprende el análisis del ciclo de vida, evaluando la disminución de emisiones de CO₂-e del sistema respecto a materiales tradicionales, en este capítulo se integra también el análisis del beneficio social, que comprende los costos económicos.

En el capítulo cuatro se muestran las propiedades mecánicas, los resultados de las pruebas a compresión de todas las pilas y muretes fabricados.

Dentro del capítulo cinco se reportan los resultados del ensaye del muro, la descripción del dispositivo, su construcción y la instrumentación colocada.

El capítulo seis contiene las conclusiones que se plantean a partir del comportamiento observado de la mampostería sujeta de estudio.

CAPÍTULO 2. MEZCLA

2.1 Antecedentes

Los bloques de suelo estabilizado son objeto de estudio en diversos países, provocando la presencia de una gran variedad de mezclas, lo que resulta bastante natural si se considera que los recursos naturales disponibles, además de factores económicos, sociales y ambientales nunca son los mismos; incluso dentro de una pequeña región estas variables difieren. A continuación se mencionan algunos parámetros considerados en la determinación de factibilidad de una mezcla.

La composición del suelo es fundamental, ya que, los suelos con altas cantidades de arcilla (mayor a 20% en el análisis de granulometría) conducen a resistencias a compresión bajas (Bryan, 1988); otro factor importante es la compactación, procedimiento que tiene una relación directa con la resistencia a compresión y el contenido de vacíos de los bloques. En otras palabras, una compactación deficiente promoverá un mayor contenido de vacíos en estado seco, un menor peso volumétrico y una absorción inicial excesiva; otra variable de interés es el índice de plasticidad, Walker *et al.* (1999) mostraron que los mejores suelos para fabricar este tipo de bloques son aquellos con valores que oscilan entre 5 y 15.

En cuanto a las propiedades mecánicas de los bloques, por ejemplo, Venkatarama *et al.* (2007) reportan las conclusiones enlistadas a continuación respecto a las relaciones de cemento, tipo de suelo, de mortero y al tipo de pieza en relación a sus propiedades de adherencia.

- a) La resistencia a la compresión y a flexión de los bloques se incrementa con el contenido de cemento.
- b) Una mayor cantidad de cemento resulta en menor absorción inicial de las piezas.
- c) Conforme aumenta el contenido de cemento disminuye la porosidad de la superficie de los bloques.
- d) El módulo de elasticidad de los bloques varía de 20000 a 60000 kg/cm² y depende del contenido de cemento.
- e) Se recomienda utilizar suelos con un contenido de arcilla entre el 14 y 16% para mejorar la resistencia y durabilidad de las piezas.
- f) La adherencia se incrementa con la resistencia a compresión del mortero y para bloques suelo-cemento se obtiene mejor adherencia cuando se utiliza un mortero (1:1:6 cemento-suelo-arena).
- g) El contenido de humedad de la pieza afecta la adherencia (se observaron contenidos óptimos de humedad del orden del 10% para bloques suelo-cemento).

- h) Aunque se observan mejores niveles de adherencia en piezas machihembradas, es más efectivo utilizar bloques con superficies rugosas.

Las condiciones naturales del suelo pueden mejorarse con la inclusión de aditivos que mejoran su comportamiento, por ejemplo. Entre otros autores, Cook *et al.* (1977) estudiaron el uso de ceniza de cáscara de arroz como aditivo para bloques de arena y cemento sin compactar, favoreciendo la reacción química con el cemento gracias a la gran cantidad de sílice que contiene la ceniza.

En el estudio anterior se reportan bloques con resistencia a la compresión promedio del orden de 50 kg/cm² para una combinación en peso de (0.5 cemento + 0.5 ceniza de cáscara de arroz) : 2.75 arena y 1% de aluminato de sodio, a los 28 días. Este tipo de mezcla produce piezas con propiedades atractivas estructuralmente; sin embargo, el costo económico del aluminato de sodio requerido para estabilizar la mezcla es muy alto.

Se presentan también estudios de durabilidad en bloques de suelo-cemento con inclusión de resina de látex (Guettala *et al.*, 2006), lo que mejora dicha propiedad notablemente ya que proporciona una capa impermeable, se recomienda una proporción de 10 a 20% del peso del cemento, aunque también eleva de manera significativa los costos monetarios.

De manera similar se encuentran modelos de mezclas con diferentes aditivos, y es notable que al agregar cualquiera de ellos se elevan de manera importante los costos de producción, sin mencionar que en un análisis costo-beneficio brindan poca utilidad.

El uso de cal en lugar de cemento tiene ventajas tanto económicas como ambientales, principalmente por requerir menor tiempo y temperatura de calcinación en su fabricación y por no interferir en el flujo de aire y agua que requieren las construcciones con tierra, además de tener un costo menor al del cemento. En muchos casos también mejora las propiedades mecánicas de las piezas, Baca *et al.* (2010) reportan resistencias a compresión del orden de 50 kg/cm² en bloques comprimidos manualmente.

En cuanto a la inclusión de fibras naturales Ghavani *et al.* (1999) determinaron que una relación agua/suelo cercana al 28% en combinación con 4% en peso de fibras de henequén o de coco con una longitud cercana a los 5 cm producen piezas con una resistencia a compresión alrededor de 20 kg/cm² y una menor tendencia al agrietamiento por secado. Dada la alta absorción de las fibras de henequén, se recomienda impermeabilizarlas para mejorar la adherencia con la matriz de suelo.

La inclusión de fibras disminuye la conductividad térmica hasta en un 80%, así como el peso volumétrico respecto a la mezcla suelo-cemento-arena, Khedari *et al.* (2001 y 2005) utilizaron fibra de coco, empleando aquella que pasaba a través del tamiz número 8 (2.38 mm). Reportan valores de resistencia a compresión del orden de 40 kg/cm², con una dosificación en volumen 5.75 : 1.25 : 2 : 0.25 (suelo-cemento-arena-fibra de coco).

La fibra de agave resulta atractiva, entre otras razones, por tratarse de un material de desecho y porque gracias al proceso de molienda al que se somete sólo es necesario enjuagarla y cortarla a una medida apropiada para poder utilizarse como refuerzo de los bloques, a diferencia de otras fibras, como la de coco, por ejemplo, resultado de la venta como producto comestible, en cuyo

caso además de lavar y cortar la cáscara es indispensable algún tipo de molienda que permita una separación adecuada, sin olvidar que la corteza dura podría significar un contaminante en lugar de reforzar el material del bloque.

Para acotar el alcance del estudio fue indispensable seleccionar un grupo de mezclas que presentaran componentes con propiedades compatibles a los recursos disponibles localmente, teniendo presentes los factores sociales y ambientales de nuestra población. Para cada mezcla seleccionada se fabricaron series de cubos de 5x5x5 cm y de bloques de 12x15x32 cm con ayuda de la CINVA-RAM y se estudió su comportamiento, procurando propiedades físicas similares en todos los especímenes, de tal manera que el desempeño pudiera ser comparable.

La idea era obtener una mezcla sencilla y económica, para favorecer un proceso de fabricación y supervisión simples, además de presentar resistencia a la compresión y durabilidad que hicieran factible su utilización como material constructivo económico y confiable.

2.2 Selección de mezclas

Como se mencionó anteriormente, resulta común que al agregar cualquier aditivo a las mezclas se eleven los costos de producción, razón por lo cual, no resultaron atractivas para el estudio. Consecuentemente se consultó la literatura que incluyera análisis de mezclas para dos conjuntos de bloques, por un lado aquellos con distintos suelos y aglutinantes para su estabilización, y por otro, los que incluyeran, además, algún tipo de fibras naturales para refuerzo de los bloques sin la inclusión de ningún agente adicional.

Para este último caso se eligió la fibra de agave, como ya se mencionó, posee cualidades que la colocan como una de las más atractivas: es abundante, su costo es nulo por ser material de desecho y está libre de contaminantes. En la figura 2.1 se muestra la fibra en el estado que resulta del proceso de molienda, se puede apreciar el largo natural de la fibra, y el largo que se obtuvo después de cortarla. Aunque en esta ocasión el corte se hizo manualmente, puede realizarse utilizando algún tipo de maquinaria, como en la mayoría de los procesos industrializados, lo que, no necesariamente eleva en exceso el costo ambiental debido a la cantidad de fibra que se requiere.



Figura 2.1. Fibra de agave utilizada como refuerzo de los bloques

2.3 Localización del banco potencial

Inicialmente fue necesario localizar un banco potencial en una zona de bajos recursos y con un desarrollo social limitado, para tal efecto se propuso el poblado de Zumpango en el estado de Tlaxcala, ubicado a 20 km al noroeste de la ciudad de Apizaco aproximadamente, perteneciente al municipio de Tlaxco. En la localidad habitan familiares del autor, lo que simplificó la disponibilidad necesaria para obtener las muestras de suelo.

El poblado cuenta con una población aproximada de 1100 habitantes, su actividad principal es la agricultura de temporada (maíz, sorgo y trigo) destinando la mayor parte de la producción al autoconsumo. La economía local se vería favorecida con una actividad adicional, que promovería la generación de un ingreso fuera de la temporada de cultivo, además de la obtención de un material de autoconstrucción; mejorando así, el bienestar social de la comunidad.

En la zona se han fabricado ladrillos tradicionalmente, incluso actualmente se encuentra la fábrica Novaceramic, que se localiza a unos 10 Km al este del banco propuesto. El muestreo del banco para fines del proyecto se hizo 60 cm por debajo del nivel superficial para evitar el contenido de materia orgánica, a pesar de que el tepetate se encuentra en la superficie como se muestra en la figura 2.2 donde se observa un panorama general del banco.



Figura 2.2. Panorama del banco potencial.

2.4 Evaluación del suelo

Es notable en la figura 2.2 que el material a utilizar está prácticamente en la superficie, facilitando su adquisición, aunque también puede presentar propiedades alteradas, distintas a las del material bajo una capa superficial. Por tal motivo, para determinar las propiedades del suelo se realizó una pequeña excavación en un sitio aleatorio del banco potencial a poco más de un metro de profundidad para evitar el estrato que contiene materia orgánica, a fin de obtener una muestra representativa, parte del procedimiento se puede apreciar en la figura 2.3.

Una vez extraída la muestra fue envuelta en plástico, procurando que conservara las propiedades que presenta naturalmente, posterior a ello se trasladó al Laboratorio de Geotecnia con que cuenta la unidad Azcapotzalco de la Universidad Autónoma Metropolitana, para llevar a cabo los análisis pertinentes. Estos se describen brevemente en los próximos párrafos.

Un criterio para la clasificación de suelos es el que parte de la granulometría del mismo, en ella se determinan los límites del tamaño de las partículas que los constituyen, se lleva a cabo mediante una prueba de cribado, que permite separar las partículas por tamaño. La figura 2.4 muestra el equipo utilizado en este proceso, consiste en un juego de cribas en que el tamiz o malla se ordena de forma descendiente, del número cuatro al doscientos, este número se refiere a la cantidad de cuadros por pulgada que presenta el tamiz correspondiente.



Figura 2.3. Muestreo del suelo.



Figura 2.4. Equipo de cribado

En la figura 2.5 se muestra un comparativo entre la granulometría obtenida del suelo en estudio y la sugerida por Venkatarama *et al.* (2007), para la determinación de un suelo óptimo, en ella se puede notar que el suelo de estudio se ajusta considerablemente bien a los modelos 1 y 2, reconstituidos por Venkatarama *et al.* (2007) y que ofrecieron los mejores resultados en cuanto a propiedades mecánicas; la muestra de suelo de Tlaxcala sin embargo, no contiene la misma cantidad de finos, de tal manera que el volumen del aglutinante requerido para un buen desempeño es superior al utilizado en el estudio mencionado.

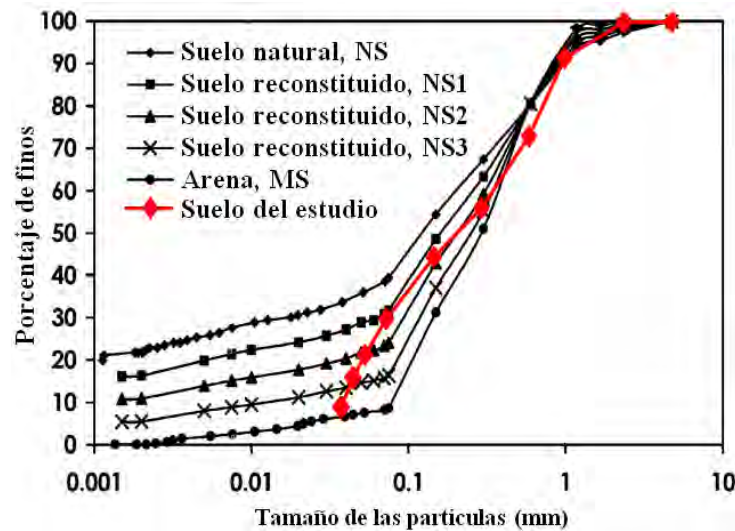


Figura 2.5. Prueba y curva de granulometría para el suelo de estudio.

Un análisis granulométrico no permite apreciar debidamente la plasticidad de un suelo, que depende principalmente de la cantidad de finos que contiene. Los límites de consistencia o límites de Atterberg definen los límites en que puede presentarse un suelo: líquido, plástico o sólido. Estos límites son: el límite de plasticidad (LP), el límite líquido (LL) y el límite de retracción (LR). El índice plástico está dado por $IP = LL - LP$, valor que permite estimar el contenido de arcillas del suelo, un valor grande indica un contenido elevado, por el contrario uno muy bajo indica un contenido bajo de ellas.

Los valores obtenidos para los límites de Atterberg en el estudio son los siguientes:

Límite líquido: $LL = 30.93$,

Límite plástico: $LP = 26.28$

Índice de plasticidad: $IP = 4.6$.

Este resultado es congruente con la granulometría, pues indica un bajo contenido de finos, y sugiere una ligera modificación, ya que, como se mencionó anteriormente, los valores encontrados en la literatura indican que los suelos más idóneos para la producción de bloques de suelo-cemento son los que presentan valores de plasticidad entre 5 y 15. Para tal efecto, se aumentó un poco la cantidad de finos triturando las partículas, adelante se describe el procedimiento utilizado.

Se realizó la Prueba Proctor Estándar, ilustrada por la figura 2.6, aunque estrictamente no era necesaria porque el suelo fue sometido a una presión mayor durante la fabricación de los bloques, sin embargo, ésta proporcionó un estimado de la humedad que debe presentar el suelo al momento de ser comprimido; la prueba determina una humedad óptima, produciendo el máximo peso específico seco que puede lograrse bajo este procedimiento de compactación. Los resultados obtenidos de la prueba fueron los siguientes:

Peso específico máximo: $\gamma_{\text{máx}} = 1.432 \text{ ton/m}^3$

Humedad óptima: $W_{\text{opt}} = 26.63$



Figura 2.6. Prueba Proctor.

2.5 Fabricación de CINVA-RAM y prensa para cubos

Teniendo como objetivo un ensaye de cubos representativo del comportamiento esperado en los bloques, se construyó una prensa sencilla que proporciona un esfuerzo de compactación similar al que los bloques serían sometidos en la CINVA-RAM. Como calibración de la prensa se realizaron bloques y cubos de manera paralela y se determinaron pesos volumétricos similares, de tal manera que ambos procesos arrojaran piezas de las mismas características, el contenido de agua también fue considerado al fabricar tanto cubos como bloques del mismo material.

Con el propósito de no dañar los cubos, el molde es desarmable, diseñado de forma tal, que al ser sometido a la presión lateral del suelo no se deformara y produjera cubos de 5 cm por lado, la altura de los bloques (5 cm) es la misma a la que el émbolo de la prensa puede llegar, el molde está sujeto a la base de la prensa para evitar que se presentara movimiento lateral o vertical durante la ejecución. En la figura 2.7 se muestra el proceso de fabricación de los cubos, así como, los detalles de la prensa, cuyo cuerpo principal se trata de una sección canal, reforzada con atiesadores en el alma bajo la zona de presión para resistir tal efecto.

Una vez calibrados los volúmenes de material y su contenido de humedad, se fabricaron tres cubos de suelo simple y tres cubos con un 10% de cemento en peso para obtener los pesos volumétricos seco y saturado. Los datos obtenidos quedan contenidos en la tabla 2.1.



Figura 2.7. Prensa para la fabricación de cubos.

Tabla 2.1. Pesos volumétricos saturado y seco del suelo

	Peso volumétrico saturado (ton/m ³)	Peso volumétrico seco (ton/m ³)
Peso volumétrico de suelo simple	1.57	1.32
Peso volumétrico de suelo + cemento	1.67	1.37

2.6 Inclusión de fibras de refuerzo

Para estudiar el comportamiento de los bloques reforzados con fibras naturales, se incluyeron diferentes porcentajes de fibra de agave (producto de desecho en la fabricación de Tequila), con una longitud aproximada de 5 cm para evitar un agrietamiento en las piezas debido a la contracción durante el secado (Cook *et al.*, 1977; Bryan, 1988; Madhava *et al.*, 1996; Venkatarama y Gupta, 2006; Venkatarama *et al.*, 2007; Walker y Stace, 1997; Walker, 1999; Ghavani *et al.*, 1999; Khedari *et al.*, 2005; y Guettala *et al.*, 2006).

Las fibras fueron sometidas a dos tratamientos impermeabilizantes distintos, a fin de minimizar la contracción por secado: con cal y con un sellador para madera. En ambos casos se hicieron diferentes pruebas antes de decidir en qué porcentajes serían agregados, para la cal se buscó que el residuo no fuera excesivo, lo que puede notarse a simple vista y se logró agregándola poco a poco en agua, hasta que dejó de diluirse.

En la figura 2.8 se aprecia el tratamiento de las fibras con cal, en el cual, se calentó agua en una charola metálica, sin llegar al punto de ebullición, mientras la cal era disuelta y las fibras se agregaron paulatinamente; posteriormente la fibra se retiró con ayuda de una malla plástica para exprimirla, dejarla secar y añadirla al día siguiente a la mezcla.

El tratamiento de las fibras con el sellador para madera, cuyo proceso se ilustra en la figura 2.9, consistió inicialmente en encontrar una concentración de sellador que no aglutinara la fibra y conservara en la medida de lo posible los atributos del sellador; primero se realizaron pruebas en pequeñas porciones de fibra, el sellador fue diluido agregando diferentes porcentajes de agua, 100, 200 y 300%, finalmente 300% de agua fue suficiente.

Para impregnar la fibra, ésta se colocó sobre una malla metálica, después de rociarla con el sellador diluido se extendió y se dejó secar, al día siguiente fue incluida en la mezcla.



Figura 2.8. Tratamiento de las fibras con cal.



Figura 2.9. Tratamiento de las fibras con sellador para madera.

2.7 Cubos

Para obtener la resistencia a compresión de las mezclas se fabricaron las siguientes series de cubos, en todos los casos el contenido de cemento es de 8% en peso y las fibras fueron tratadas con cal, excepto donde se indica:

- 1) Suelo + cemento compactado con varilla, análogo a un mortero*
- 2) Suelo + cemento (Testigo)
- 3) Suelo + cemento + fibras 5% en peso**
- 4) Suelo + cemento + fibras 5%
- 5) Suelo + cemento + fibras 10%
- 6) Suelo + cemento + fibras 10%
- 7) Suelo + cemento + fibras 15%
- 8) Suelo + cal*

*La primera serie no pudo ensayarse, no consiguió una consistencia suficiente.

** Tratadas con sellador

Los cubos no se sometieron a ningún proceso especial de curado, se mantuvieron dentro de un cuarto a temperatura ambiente sin control de humedad y se ensayaron a compresión a los 28 días, las pruebas se realizaron en la máquina universal como puede observarse en la figura 2.10, imprimiendo la carga a una velocidad de 0.012 mm/seg, sin impacto ni pérdida de carga, de tal manera que la prueba puede clasificarse como estática.

2.7.1 Resistencia a compresión en cubos

Los resultados para los cubos de suelo-cemento se resumen en la tabla 2.2, en ella puede notarse que las series de cubos que contienen fibras sin tratamiento y fibras tratadas con sellador, presentan un peso volumétrico inferior al de la serie de cubos que incluye fibras tratadas con cal; comparando las resistencias obtenidas en estas tres series, puede inferirse que la resistencia a compresión mantiene una estrecha relación con el peso volumétrico.

Para los cubos de suelo-cal, al igual que los cubos con un porcentaje mayor al 5% de fibras fue difícil conseguir un peso volumétrico alto, y se ve reflejado en una disminución notable en la resistencia a compresión, como se observa en la tabla 2.3. Como se verá más adelante, un mayor peso volumétrico conduce también a un mejor desempeño en la prueba de durabilidad, así que, se procuró un peso volumétrico mínimo de 1.7 ton/m³, para obtener una resistencia a compresión cercana a los 40 kg/cm².



Figura 2.10. Pruebas de compresión en cubos.

Tabla 2.2. Resultados de las pruebas a compresión de cubos suelo-cemento-fibra

PORCENTAJE DE FIBRA	FIBRAS TRATADAS	PESO (g)	PESO ESPECIFICO (ton/m ³)	CARGA APLICADA (kg)	ESFUERZO (kg/cm ²)	ESFUERZO PROMEDIO (kg/cm ²)
0	-	222	1.78	419	17	42
0	-	210	1.68	962	38	
0	-	253	2.02	1803	72	
5	NO	188	1.50	295	12	12
5	NO	190	1.52	246	10	
5	NO	220	1.76	343	14	
5	CAL	255	2.04	1404	56	53
5	CAL	252	2.02	1291	52	
5	CAL	252	2.02	1273	51	
10	CAL	226	1.81	814	33	44
10	CAL	228	1.82	1297	52	
10	CAL	247	1.98	1205	48	
15	CAL	161	1.29	715	29	39
15	CAL	245	1.96	1140	46	
15	CAL	227	1.82	1076	43	
5	SELLADOR	188	1.50	206	8	6
5	SELLADOR	194	1.55	94	4	
5	SELLADOR	161	1.29	136	5	

Tabla 2.3. Resultados de las pruebas a compresión de cubos suelo-cal.

PESO (g)	PESO ESPECIFICO (ton/m ³)	CARGA APLICADA (kg)	ESFUERZO (kg/cm ²)	ESFUERZO PROMEDIO (kg/cm ²)
198	1.58	199	8	12
195	1.56	278	11	
196	1.57	259	10	
206	1.65	509	20	

2.7.2 Durabilidad de cubos

Los cubos se sometieron a una prueba considerada severa para evaluar su durabilidad, el procedimiento ASTM (1989), en el cual inicialmente las piezas se introducen a un horno por 24 horas o más, hasta que el peso sea constante -peso seco inicial-, después de lo cual se someten a un total de 12 ciclos, cada uno de ellos comprende la inmersión total de la pieza en agua por cuatro horas, para posteriormente introducirla en un horno a 100°C por 20 horas más, al final de los doce ciclos se seca completamente la pieza en el horno hasta obtener nuevamente un peso constante -peso seco final-, los resultados se encuentran en la tabla 2.4 y parte del proceso queda ilustrado en la figura 2.11.

Tabla 2.4. Resultados de las pruebas de durabilidad en cubos de suelo-cemento-fibra

% DE FIBRA	FIBRAS TRATADAS	PESO HUMEDO (g)	PESO ESPECIFICO (ton/m ³)	PESO INICIAL (g)	PESO FINAL (g)	% PERDIDO	PÉRDIDA PROMEDIO %
0	-	216	1.73	179	136	24	16
0	-	226	1.81	187	163	13	
0	-	236	1.89	189	168	11	
5	NO	229	1.83	199	173	13	13
5	NO	240	1.92	209	182	13	
5	NO	243	1.94	212	187	12	
5	CAL	233	1.86	193	166	14	17
5	CAL	252	2.02	208	177	15	
5	CAL	229	1.83	188	144	23	
10	CAL	222	1.78	177	110	38	31
10	CAL	238	1.90	192	126	34	
10	CAL	226	1.81	182	142	22	
15	CAL	230	1.84	184	0	100	100
15	CAL	236	1.89	189	0	100	
15	CAL	241	1.93	195	0	100	
5*	PROMOTOR	219	1.75	183	162	11	17
5*	PROMOTOR	199	1.59	167	132	21	
5*	PROMOTOR	195	1.56	163	131	20	

*Este "promotor", es el sellador para madera con el que se intentaba promover la adherencia y mejorar la durabilidad. Como puede notarse la durabilidad es mejor con un porcentaje menor de fibra, sin necesidad de agregar costos económicos o energéticos.



Figura 2.11. Prueba de durabilidad en cubos.

En la tabla 2.5 se muestra un resumen de los resultados en las pruebas a compresión y durabilidad de los cubos con los diferentes porcentajes de fibras, la última fila corresponde a la mezcla suelo-cal, sin fibra, como se mencionó antes, para ésta no se consiguió un peso volumétrico superior a 1.65 ton/m^3 , y la resistencia a compresión que mostraron los cubos fue una de las más bajas, razón por la que no se fabricaron bloques de esta mezcla. Para enfatizar el motivo de eliminación de cada mezcla, en la tabla aparecen marcados los valores de los cubos que presentan un resultado promedio bajo, bien sea de compresión o de pérdida.

Tabla 2.5. Resumen de resultados de las pruebas en cubos

% DE FIBRA	FIBRAS TRATADAS	ESFUERZO PROMEDIO (kg/cm ²)	PÉRDIDA PROMEDIO %
0	-	42	16
5	NO	12	13
5	CAL	53	17
10	CAL	44	31
15	CAL	39	100
5	PROMO	6	17
SUELO-CAL	-	12	-

A partir de la discriminación anterior se fabricaron las siguientes series para obtener la resistencia a compresión de los bloques:

- 1) Suelo + cemento
- 2) Suelo + cemento + fibra 5% en peso, tratadas con cal

2.8 Bloques

De manera análoga al procedimiento que se siguió con los cubos, los bloques tampoco fueron sometidos a ningún proceso de curado, se mantuvieron dentro de la habitación que antes ocuparan los cubos, también a temperatura ambiente y se ensayaron a compresión a los 28 días.

Las pruebas se realizaron en la máquina universal como puede observarse en la figura 2.12, imprimiendo la carga bajo las mismas condiciones, de tal manera que la prueba también fuera estática.

2.8.1 Resistencia a compresión en bloques

La naturaleza del material de los bloques impidió su cabeceo, se hicieron intentos con azufre, aun cuando era evidente la incompatibilidad de los materiales; también se intentó cabecear con yeso, sin obtener un resultado positivo, en este caso, además de presentar una adherencia poco adecuada, la superficie resultante era más deficiente que las caras del bloque.

Para realizar el ensaye simplemente se colocó una placa o platina de 5/8" de espesor sobre los bloques, proporcionando así una aplicación homogénea de la carga sobre la probeta, en la base no se colocó ningún dispositivo. Previo a cada prueba el espécimen correspondiente se alineo al centro del cabezal inferior de la máquina universal, tomando como referencia las marcas que tiene el cabezal en dos direcciones.



Figura 2.12. Pruebas a compresión en bloques

Los resultados de las pruebas a compresión se presentan en las siguientes tablas. La tabla 2.6 contiene los valores obtenidos en las pruebas de bloques suelo-cemento, y en la tabla 2.7 se encuentran los resultados correspondientes a los bloques suelo-cemento-fibra.

Tabla 2.6. Esfuerzos a compresión para bloques suelo-cemento.

CARGA (kg)	ESFUERZO (kg/cm ²)	ESFUERZO PROMEDIO (kg/cm ²)
7546	20	21
8234	21	
6894	18	
7710	20	
8612	22	
7773	20	
9173	24	
8714	23	
5905	15	
8180	21	

Tabla 2.7. Esfuerzos a compresión para bloques suelo-cemento-fibra.

CARGA (kg)	ESFUERZO (kg/cm ²)	ESFUERZO PROMEDIO (kg/cm ²)
5728	15	18
4930	13	
4193	11	
6840	18	
8309	22	
6541	17	
8402	22	
7649	20	
8502	22	

2.8.2 Durabilidad en bloques

La prueba de durabilidad se realizó siguiendo el procedimiento descrito ASTM (1998), se utilizó el mismo horno para el secado que se llevó a cabo a la misma temperatura, las piezas se sumergieron en una pileta para asegurar espacio suficiente, dadas las dimensiones de las piezas. En la tabla 2.8 se presentan los resultados correspondientes.

Tabla 2.8. Resultados de las pruebas de durabilidad en bloques de suelo-cemento-fibra

BLOQUE	FIBRA	PESO INICIAL (kg)	PESO FINAL (kg)	% PERDIDO	PÉRDIDA PROMEDIO %
1	NO	8.45	7.66	9	10
2	NO	8.36	7.45	11	
3	NO	8.24	7.28	12	
4	NO	8.39	7.57	10	
5	SI	8.12	7.13	12	13
6	SI	7.75	6.81	12	
7	SI	8.88	7.39	17	
8	SI	9.01	7.93	12	

Tabla 2.9. Resumen de resultados para cubos y bloques suelo-cemento-fibra

TIPO DE PIEZA	FIBRAS	ESFUERZO PROMEDIO (kg/cm ²)	PÉRDIDA PROMEDIO %
CUBO	-	42	16
CUBO	SÍ	53	17
BLOQUE	-	21	10
BLOQUE	SÍ	18	13

A partir de las tablas 2.5, 2.6, 2.7 y 2.8 se genera la tabla 2.9 donde se muestra un resumen de los resultados en las pruebas a compresión y durabilidad de los bloques y cubos con y sin fibras, en ella se puede observar que la tendencia de los materiales es consistente, la mezcla suelo-cemento simple genera piezas con una resistencia menor y una mayor durabilidad en comparación con los especímenes que contienen fibras.

En resumen, a consecuencia de las diferencias en las propiedades del suelo en comparación a otros estudios, la selección de un modelo de mezcla que proporcione las cualidades necesarias para lograr resultados satisfactorios, ha resultado en la elección del modelo de suelo-cemento simple ya que el costo-beneficio de agregar fibras a la mezcla no ofrece bondades significativas.

2.9 Bloques con suelo triturado

Para concluir la cuarta etapa del proyecto se modificó la constitución del suelo a fin de proporcionar características más cercanas a las señaladas en la literatura, para tal efecto se trituró rolando una barra de acero a manera de rodillo, sobre el material previamente esparcido en una superficie de concreto limpia, logrando alterar la granulometría, principal motivo por el que no era posible considerarlo un suelo óptimo para la estabilización.

Como se mencionó antes, Walker *et al.* (1999), mostraron que los mejores suelos para fabricar este tipo de bloques son aquellos con un índice de plasticidad entre 5 y 15, recordemos que el suelo de estudio originalmente presentaba un índice de plasticidad de 4.6. La figura 2.13 ofrece un comparativo entre la curva obtenida del suelo en estudio sin alterar (serie en color azul), la que corresponde al suelo triturado (serie en color rojo) y la sugerida por Venkatarama *et al.* (2007), para la determinación de un suelo óptimo.

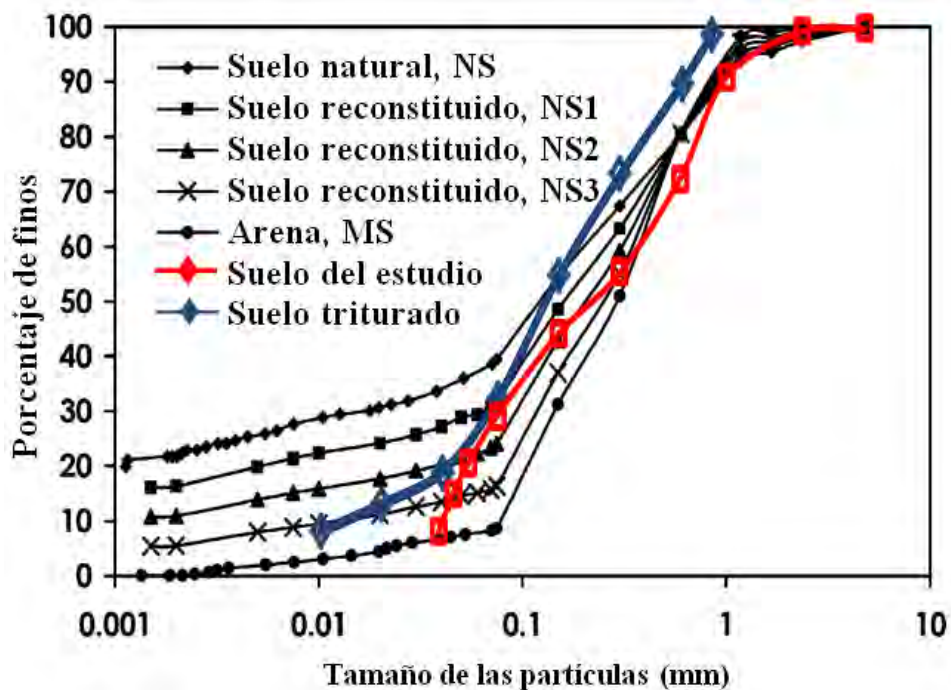


Figura 2.13. Comparativo entre la curva granulométrica sugerida, la granulometría del suelo original y la granulometría del suelo triturado

La curva del suelo original se ajusta considerablemente bien a los modelos 1 y 2 -reconstituidos y considerados como óptimos debido a que las piezas fabricadas con ellos presentaron las mejores propiedades- excepto por la zona baja de la curva, que corresponde a las partículas más finas.

El suelo triturado en cuanto al contenido de finos resulta más adecuado, sin embargo la curva queda ligeramente fuera de los valores considerados como ideales en la parte superior. Esta desviación es una causa probable de que la resistencia se vea disminuida, a la vez que la durabilidad fue aceptable en esta serie de bloques.

2.9.1 Resistencia a compresión en bloques suelo triturado-cemento

Una vez alterada la granulometría del suelo se fabricó una nueva serie de bloques suelo-cemento con la CINVA-RAM y se sometieron a las pruebas de compresión y de durabilidad bajo el procedimiento descrito anteriormente, el resultado de los ensayos a compresión de estos bloques se presentan en la tabla 2.10.

Tabla 2.10. Esfuerzos a compresión para bloques suelo triturado-cemento

BLOQUE	PESO (g)	PESO ESPECIFICO (ton/m ³)	CARGA APLICADA (kg)	ESFUERZO (kg/cm ²)
1	9840	1.71	5650	15
2	10140	1.76	9469	25
3	10260	1.78	9366	24
4	9990	1.73	8666	23
5	9860	1.71	8980	23
6	9920	1.72	7989	21
7	10230	1.78	5845	15
8	9905	1.72	6655.6	17
9	9717	1.69	6706	17
10	10130	1.76	6392	17
11	10175	1.77	7109	19
12	10110	1.76	8010	21
13	10170	1.77	7610	20
14	10090	1.75	5909	15
15	10370	1.80	6856	18
16	10400	1.81	5250	14
17	9945	1.73	8487	22
18	9945	1.73	8351	22
19	10240	1.78	5232	14
20	10405	1.81	6547	17
Promedio				19

El esfuerzo promedio de estos bloques fue de 19 kg/cm², cerca del 10% inferior al de la serie con suelo sin triturar, cuya resistencia promedio fue de 21 kg/cm², reportado previamente en la tabla 2.6.

2.9.2 Durabilidad en bloques suelo triturado-cemento

Los bloques de suelo triturado-cemento se sometieron al procedimiento ASTM (1989), descrito anteriormente, los resultados se muestran en la tabla 2.11.

Tabla 2.11. Resultados de las pruebas de durabilidad bloques suelo triturado-cemento

BLOQUE	PESO INICIAL (kg)	PESO FINAL (kg)	% PÉRDIDA	PÉRDIDA PROMEDIO %
1	9.02	8.22	9	8
2	8.67	7.95	8	
3	9.74	8.94	8	
4	9.64	8.89	8	

Puede observarse en la tabla anterior que se redujo la pérdida respecto a la serie realizada con el suelo sin triturar en que el promedio fue del 10%, es decir, cerca de 20% menos.

2.10 Resultados

El suelo reconstituido produce bloques que tienen un comportamiento más estable en lo que se refiere a durabilidad, aunque se reduce un poco la resistencia, probablemente se deba a que la humedad óptima obtenida en la prueba Proctor se obtuvo con el suelo natural, y al triturarlo con la barra de acero, esta condición cambió. Resultó notable al fabricar los primeros bloques con el suelo reconstituido que las propiedades físicas que presentaban eran distintas, mayor densidad y una consistencia más húmeda al retirarlos de la CINVA-RAM.

Con el análisis de estos resultados se tomó la decisión de utilizar la mezcla de suelo reconstituido con un 8% de cemento para la fabricación de los bloques con los que se realizarían las pilas, los muretes y el muro de 2x2 m, ya que si bien se pierde un 10% de resistencia en comparación de los bloques con suelo natural, también se gana un 20% de durabilidad. La tabla 2.12 contiene los resultados de las pruebas a compresión y durabilidad obtenidos para los especímenes fabricados con esta mezcla.

Tabla 2.12. Resumen de resultados para cubos y bloques suelo-cemento y bloques suelo-cemento triturado

TIPO DE PIEZA	SUELO	ESFUERZO PROMEDIO (kg/cm ²)	PÉRDIDA PROMEDIO %
CUBO	NATURAL	53	17
BLOQUE	NATURAL	21	10
BLOQUE	TRITURADO	19	8

CAPÍTULO 3. ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA

3.1. Antecedentes

El cambio climático es considerado una amenaza para el ambiente y en las últimas décadas se ha convertido en uno de los temas globales más preocupantes. Una de las causas más importantes del problema es la emisión de gases de efecto invernadero y entre ellos destaca el dióxido de Carbono (CO₂), que tiene como fuentes principales (Worrell *et al.*, 2001):

- La quema de combustibles fósiles
- Incineración de biomasa
- Deforestación
- Fuentes minerales de CO₂

La industria de la construcción es una de las que más contribuye a la emisión de gases tipo invernadero gracias a las grandes cantidades de acero y concreto que utiliza (Arroyo, Ordáz y Gilmore, 2012). La materia prima necesaria para la fabricación de estos materiales es abundante, favoreciendo su disponibilidad prácticamente en todos los países. Como se mencionó en el capítulo 1, para cuantificar las emisiones de gases invernadero de un proceso específico todos los gases se transforman en una emisión equivalente de CO₂ (CO₂-e).

La industria cementera es clave para la producción del cemento, es tal su importancia dentro del sector constructivo que su producción es uno de los índices de la actividad económica. De acuerdo al Consejo Mundial de Energía (1995), la industria cementera representa un 2% de la energía consumida globalmente, o bien, cerca de un 5% de la energía utilizada por el sector industrial. En el proceso de fabricación del concreto existen dos elementos que son especialmente importantes en la emisión de CO₂ y colocan a esta industria como una de las mayores fuentes de emisión del gas (Hanle *et al.*, 2004):

- El uso de combustibles fósiles como el carbón, por ejemplo, utilizado en la producción del Clinker
- El proceso de calcinación presente también en la producción de Clinker

Lo anterior no toma en cuenta la interacción de la industria cementera con otras industrias o procesos que contribuyen a la emisión de gases tipo invernadero, como la generación de la energía eléctrica que consume o la quema de combustibles fósiles durante la transportación, por mencionar algunos.

Son estas interacciones las que han favorecido la falta de consenso global para determinar las fronteras de análisis necesarias para calcular las emisiones de los diferentes materiales de construcción, algunos autores no consideran la transportación de la materia prima o del producto

terminado, por ejemplo, ya que rigurosamente este no se encuentra dentro del proceso de fabricación mencionado.

Para realizar un análisis de ciclo de vida es necesario establecer sus fronteras, y en lo que se refiere a materiales para construcción como los que se tratan en el presente estudio se encuentran cuatro procesos principales:

1. Obtención de materia prima (en este caso los tres tipos de bloque que se van a comparar)
2. Edificación
3. Mantenimiento
4. Demolición y reciclaje o reutilización de materiales

Cada uno de los procesos mencionados tiene a su vez etapas bien definidas, y tantas variables como sean necesarias para tener un análisis refinado; sin embargo, es importante mencionar que algunas de las variables intervienen simultáneamente en un proceso totalmente ajeno al objetivo particular del estudio correspondiente; precisamente por eso resulta necesario establecer en el objetivo del análisis las actividades de interés que permitan una valoración de los resultados obtenidos.

De los cuatro apartados que conforman el ciclo de vida de materiales para construcción mencionados anteriormente, el análisis tiene como objetivo la evaluación de las emisiones de dióxido de carbono equivalente ($\text{CO}_2\text{-e}$) en relación a la primera etapa, la obtención de materia prima.

Para tal efecto se realizará el cálculo de las emisiones causadas por la fabricación de bloques suelo-cemento y se comparará con los valores correspondientes a la fabricación de piezas perforadas de barro cocido y bloques de concreto, recordando que provienen de revistas científicas con arbitraje riguroso. Se puede observar claramente la dispersión en los datos, debido principalmente a las consideraciones que se toman para definir las fronteras de análisis.

Esta característica clasifica al conjunto de datos dentro de un proceso de experimentación: el proceso de selección aleatoria, caracterizado por la extracción aleatoria de uno o más individuos de entre el conjunto de los que constituyen la población estudiada. Los procesos de extracción aleatoria son fundamentales en la inferencia estadística, ya que, a partir de ellos puede deducirse toda la teoría del muestreo, y desde el punto de vista práctico, las hipótesis de este tipo de procesos nos conducen en muchos casos a la distribución Normal o alguna de sus distribuciones derivadas.

Además de la distribución normal, es conveniente conocer otras distribuciones, en las que se basa gran parte de la estrategia de la Estadística Inferencial y que se pueden introducir a partir de la distribución Gamma (Vargas, 1995), que sirve de modelo en los problemas de teoría de colas. Uno de sus casos particulares es la distribución exponencial, esta se emplea en estudios de confiabilidad y tiene un papel fundamental desde el punto de vista conceptual y práctico, aunque

algunas veces esta distribución no proporciona ajustes apropiados para modelar los datos obtenidos de un experimento.

Con los datos recabados en el estudio se obtuvo un mejor ajuste utilizando una distribución log-normal, modelo que ofrece ajustes razonables para el caso de datos experimentales (Hernández y Usuga, 2011); de tal manera que en lugar de trabajar con el promedio de los datos se utilizó la media en una distribución log-normal, es decir, con el promedio de los logaritmos naturales.

El análisis pretende cuantificar las emisiones debidas a la producción de los bloques mediante un cálculo más bien cualitativo, y mostrar las ventajas referentes al costo ambiental que representa la fabricación de los bloques de suelo-cemento comparado con aquellos que provienen de un proceso industrializado.

Es importante tener presente que se considera la producción de los bloques con el uso de la CINVA-RAM manual, ya que existen algunas modificaciones en las que se ha implementado un motor eléctrico o de combustión interna que modificaría el resultado del siguiente análisis.

3.2. Análisis de ciclo de vida

En la fabricación de los bloques de suelo estabilizado se distinguen cuatro etapas principales:

1. Producción de materia prima (cemento)
2. Adquisición de materia prima (suelo)
3. Fabricación de los bloques
4. Empaque y distribución del producto final

Como puede observarse, se consideran empaque y distribución como una sola etapa, generalmente el empaque es tomado en cuenta sólo como una fracción de la energía requerida para la transportación, dado que el empaque de las piezas generalmente se lleva a cabo con un plástico envolvente previa colocación de los bloques en una tarima de madera generalmente reutilizada varias veces, en el análisis no se considera este rubro.

Para la fabricación de los bloques se contempla una producción tan local como sea posible y no es comparable con las piezas de barro con perforaciones, principalmente, en cuyo caso podrían llegar a ser productos de importación o exportación. Los factores de emisión considerados para las piezas de barro con huecos y los bloques de concreto no especifican las fronteras de análisis consideradas, sin embargo, dada la dispersión en los valores no se considera que influya de manera alarmante en el resultado del análisis.

3.2.1. Evaluación de los bloques suelo-cemento.

El proceso de fabricación de bloques suelo-cemento se ilustra en el diagrama de flujo de la figura 3.1, en el que se define también la frontera de análisis y se señalan las etapas comunes con la fabricación de piezas de barro cocido con perforaciones y de bloques de concreto, lo que simplifica la comparación y justifica la diferencia en los factores de emisión, una vez que resalta las diferencias.

Nótese que dentro de las etapas comunes se considera la molienda de suelo, pensando en un volumen de producción que requiera una cantidad de suelo mayor a la que se puede reconstituir “a mano”, favoreciendo también una comparación entre los diferentes especímenes.

Dentro de la frontera del sistema se hace distinción entre la producción de cemento y la obtención del suelo gracias a que los datos del cemento se pueden obtener de artículos arbitrados y los de la obtención del suelo deben establecerse de la mejor manera posible, tratando de tomar en cuenta todos las actividades que intervienen en su obtención, o bien comparando este proceso con otro similar, suponiendo una mayor producción. Estas son las únicas materias primas que se requieren para la fabricación del bloque.

Para la etapa de producción se tomaron en cuenta las actividades involucradas en la transformación de la materia prima en el producto final, donde básicamente es nula la emisión de contaminantes, ya que, la máquina empleada en el proceso es de operación manual. Finalmente se tiene el proceso de distribución y empaque, que es excluido del análisis como se explicó con anterioridad.

Se realizó el cálculo de emisiones para los bloques suelo-cemento, considerando una elaboración casi artesanal como pretende el estudio, se tiene que el único contribuyente es el cemento, que constituye un 8% del peso de la mezcla. En la tabla 3.1 se muestran los valores de CO₂-e obtenidos en la literatura y el autor correspondiente.

**Tabla 3.1. Valores de CO₂-e en kg por tonelada
producida de cemento**

Material	Referencia	EMISIONES (kgCO ₂ -e/ton)	Logaritmo natural de las emisiones	Media	EMISIONES PROMEDIO (kgCO ₂ -e/ton)
Cemento	Tae <i>et al.</i> (2010)	556	6.32	6.66	778
	Yan <i>et al.</i> (2010)	1035	6.94		
	Zabalza <i>et al.</i> (2011)	819	6.71		

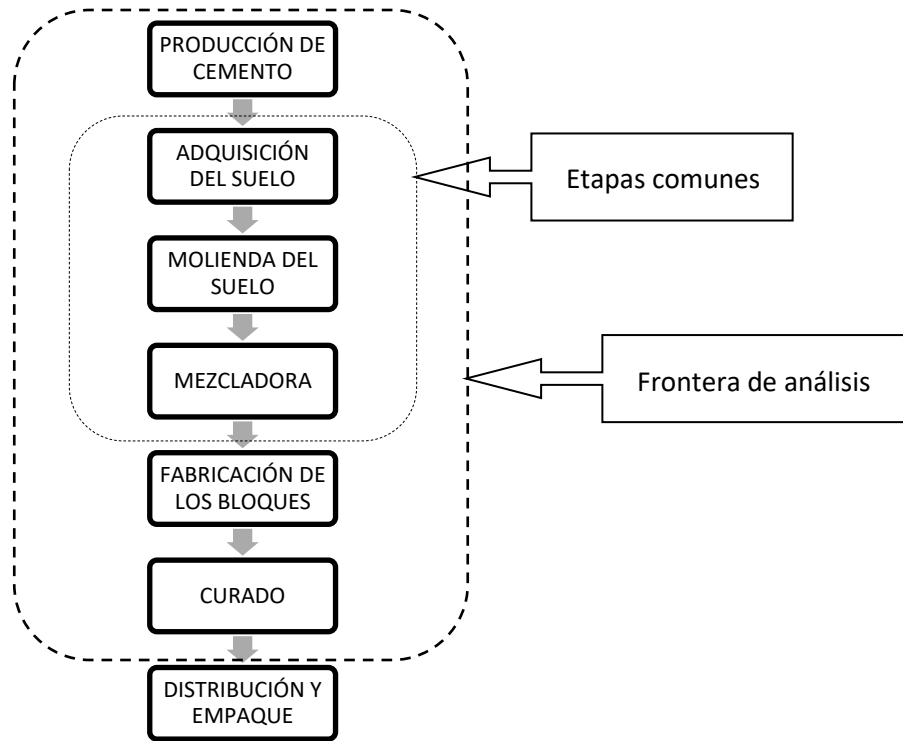


Figura 3.1. Diagrama de flujo para la fabricación de bloques suelo-cemento.

Como se mencionó anteriormente, se optó por utilizar la media de una distribución log-normal, con la intención de obtener un mejor ajuste al modelo de los datos obtenidos. Para obtener el volumen de emisiones producto de la fabricación de los bloques:

$$\frac{1 \text{ ton bloques}}{0.08 \text{ ton cemento}} = \frac{1 \text{ ton cemento}}{778 \text{ kg } CO_2 - e} \Rightarrow \frac{1 \text{ ton bloques}}{62.2 \text{ kg } CO_2 - e}$$

Con los datos anteriores, se tiene que producir una tonelada de bloques suelo-cemento emite una media de $62 \text{ kg } CO_2 - e$. No se puede ser determinante debido a la dispersión de los datos, sin embargo, el resultado es válido para un análisis cualitativo.

3.2.2. Evaluación de las piezas de barro cocido con perforaciones.

De manera análoga se tiene el diagrama de flujo de la figura 3.2 (Tena, 2001) para el ciclo de vida de piezas de barro cocido con perforaciones, comparables a los bloques de suelo-cemento al tratarse de elementos que presentan dimensiones similares, además de ser parte de un proceso de fabricación estandarizado, lo que las convierte en un punto de referencia para comparar los resultados de la evaluación de los bloques de suelo-cemento.

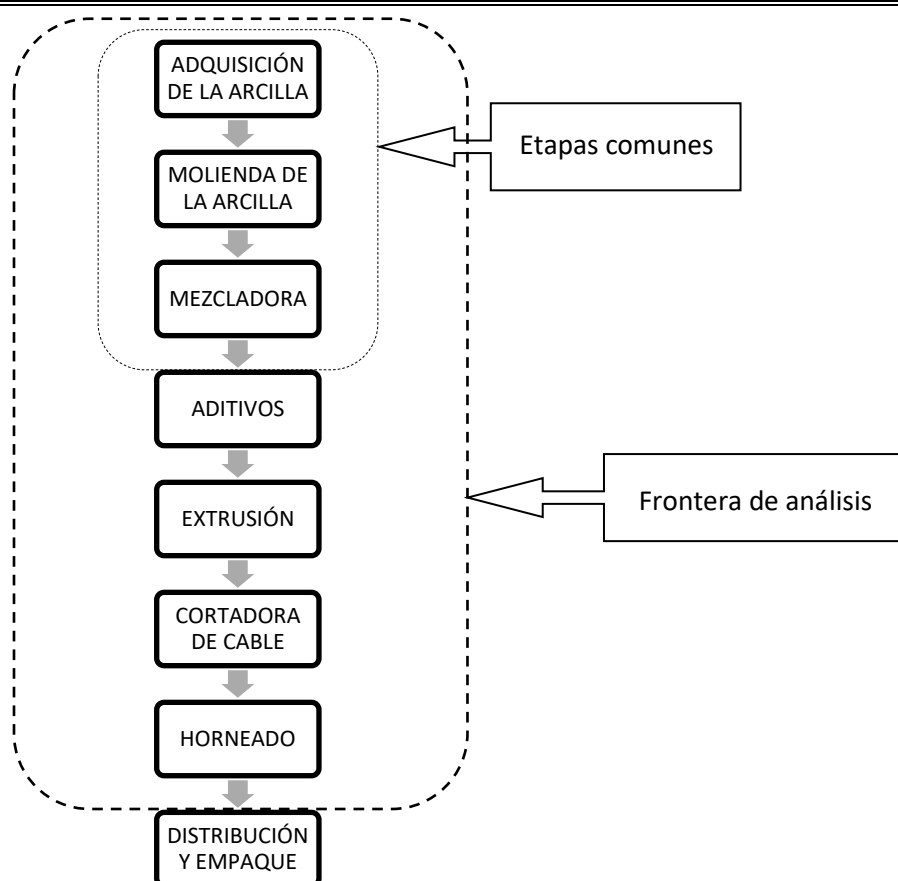


Figura 3.2. Diagrama de flujo para la fabricación de piezas de barro cocido con perforaciones.

Puede observarse que la fabricación de este tipo de piezas emplea una mayor cantidad de procesos, sin embargo, no se considera el cemento, lo que podría significar una diferencia importante en el resultado de un análisis del ciclo de vida cuantitativo.

El orden en que se colocaron los aditivos no significa que van después del mezclado, es durante el mismo que se agregan a la materia prima (suelo), se colocaron en esa posición para tener una visión más clara de las etapas comunes entre los tres procesos. La tabla 3.2 contiene los datos obtenidos en la literatura para este tipo de piezas.

Tabla 3.2. Valores de CO₂-e en kg por tonelada producida de block cerámico

Material	Referencia	EMISIONES (kgCO ₂ -e/ton)	Logaritmo natural de las emisiones	Media	EMISIONES PROMEDIO (kgCO ₂ -e/ton)
Ladrillo cerámico	González y García (2006)	40	3.70	5.18	178
	Monahan y Powell (2011)	519	6.75		
	Zabalza <i>et al.</i> (2011)	271	6.35		

Es importante señalar que el valor más bajo en las emisiones de ladrillo cerámico, 40 kgCO₂-e/ton, es incluso menor que si se utilizara el menor de los valores en la producción de cemento, 556 kgCO₂-e/ton, con lo que el 8% utilizado en los bloques sería equivalente a 45 kgCO₂-e/ton.

Este razonamiento podría no ser lejano a la realidad si recordamos que las piezas de barro con bloques no contienen cemento en el proceso de producción. Es necesario recordar que en la literatura encontramos el valor para ladrillo cerámico, y la producción de estos es igual de variable que las consideraciones hechas para definir su frontera de análisis.

3.2.3. Evaluación de los bloques de concreto.

Para la fabricación de bloques de concreto se presenta el diagrama de flujo de la figura 3.3 (Tena, 2001). En la tabla 3.3 se presentan las emisiones de CO₂-e/ton para los bloques de concreto.

La fabricación de bloques de concreto, además de contener cemento en un mayor porcentaje que los bloques de suelo-cemento, requiere triturar el agregado. A pesar de que las trituradoras de agregados usualmente utilizan motores eléctricos mayores a los que se requieren para moler el suelo, se está considerando la molienda o trituración como una etapa equivalente en los tres procesos, recordando que los datos para las piezas de barro cocido con perforaciones y los bloques de concreto provienen de revistas científicas con arbitraje riguroso, resultados de diferentes estudios y consideraciones distintas para cada autor.

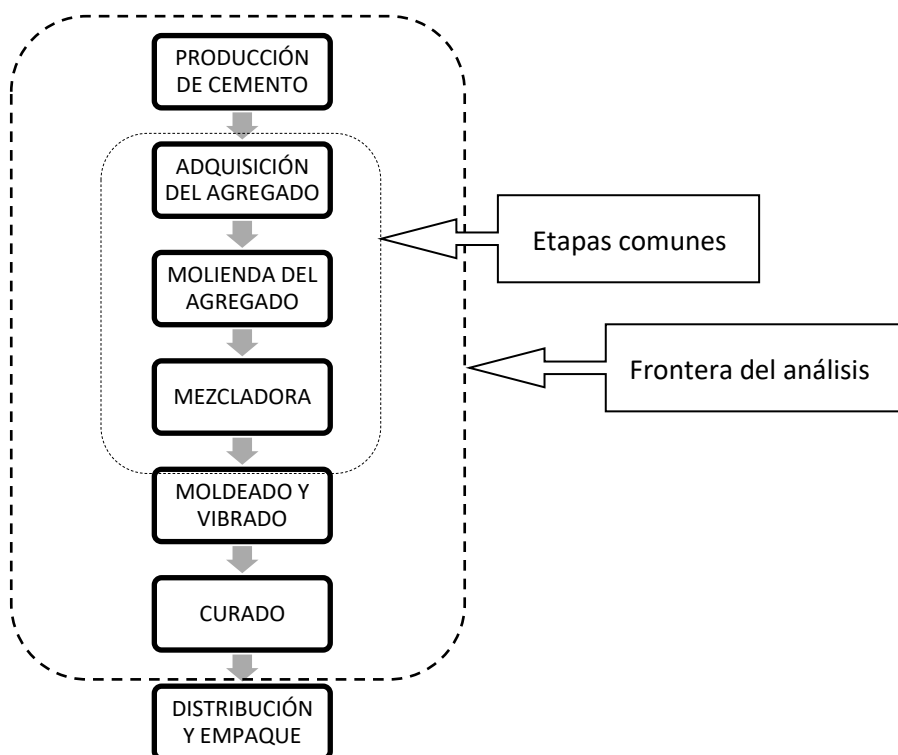


Figura 3.3. Diagrama de flujo para la fabricación de bloques de concreto.

Tabla 3.3. Valores de CO₂-e en kg por tonelada producida de block de concreto

Material	Referencia	EMISIONES (kgCO ₂ -e/ton)	Logaritmo natural de las emisiones	Media	EMISIONES PROMEDIO (kgCO ₂ -e/ton)
Block de concreto	Hacker <i>et al.</i> (2008)	120	4.79	6.11	449
	Tae <i>et al.</i> (2011)	1683	7.43		

En la tabla 3.4 se presenta un resumen de los valores obtenidos para los tres tipos de piezas analizados, en ella se hace notable que los bloques de concreto producen un volumen de emisiones más importante, aunque los números no son determinantes sí ofrecen una clara tendencia.

Tabla 3.4. Resumen de valores

Material	EMISIONES PROMEDIO (kgCO ₂ -e/ton)
Block suelo-cemento	62
Ladrillo cerámico	178
Block de concreto	449

3.3. Resultados

El resultado del análisis brinda un panorama claro sobre las ventajas ambientales que genera la producción de los bloques suelo cemento, aunque resulta un tanto obvio que una producción prácticamente artesanal no puede causar el mismo volumen de emisiones que resulta de un proceso industrializado. También resulta difícil pensar que este tipo de construcción cambiaría el paisaje en un ambiente urbano, lo que evidentemente provocaría una producción industrializada de los bloques.

La razón del estudio es mucho más simple: proponer un material de construcción asequible para las comunidades de bajos recursos que proporcione un desempeño adecuado de durabilidad y resistencia, por supuesto que quizá no tenga la capacidad de soportar el embate de un sismo de gran magnitud, lo interesante es que conserve la integridad necesaria ante un evento inesperado de este tipo. Al ser económico y local, de hecho auto producible, puede ser reemplazado sin generar el sentimiento de pérdida que generalmente embarga a este tipo de comunidades.

Por otro lado sería posible realizar simplificaciones en el sentido de que el mezclado de cualquier sistema de los tres aquí presentados puede ser manual, así como que la distribución y empaque requerido podría ser el mismo, al menos en el caso de las piezas de barro; además el curado se da en las mismas condiciones en el caso de los bloques de concreto.

También puede pensarse en moler el suelo para los bloques suelo-cemento con maquinaria, etapa que sería equivalente para los tres tipos de piezas. La definición de estas simplificaciones marca los límites del análisis del ciclo de vida para poder cuantificar el beneficio respecto a la reducción de emisiones de CO₂-e respecto a los materiales de construcción tradicionales.

CAPÍTULO 4. PROPIEDADES MECÁNICAS.

4.1. Antecedentes

Los materiales que componen la mampostería, el mortero y los bloques de suelo-cemento en este caso, poseen diferentes características esfuerzo-deformación, de tal manera, que al ser sometidos a una carga axial sufren deformaciones verticales y transversales simultáneas e iguales, entonces el material más deformable, generalmente el mortero, queda sujeto a compresiones en ambas direcciones, lo que significa que está siendo sometido a una compresión triaxial y la pieza de mampostería queda sometida a tensiones transversales y una compresión longitudinal (McNary y Abrams, 1984). En la figura 4.1 se puede observar esta distribución de esfuerzos.

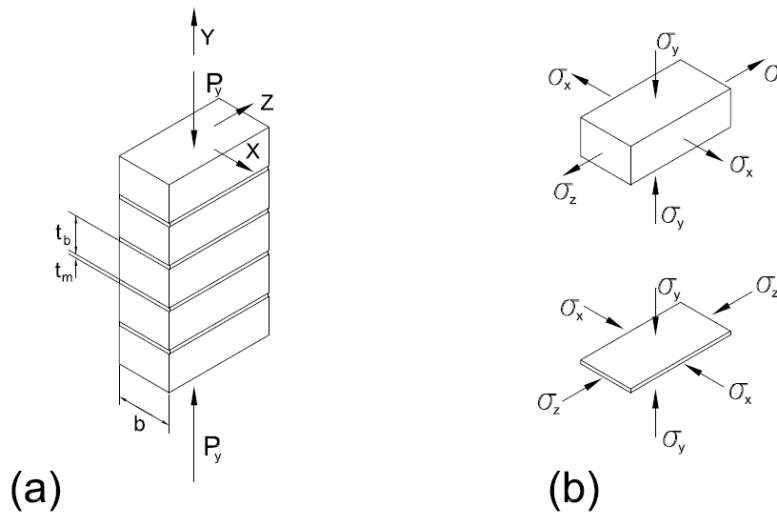


Figura 4.1. (a) Prisma sujeto a una fuerza vertical de compresión. (b) Estados de esfuerzo para las piezas y el mortero.

Puede suceder que la pieza sea más deformable que el mortero, de ser así se invierten los esfuerzos en ambos materiales, esta interacción se puede generalizar diciendo que el material más deformable incrementa su resistencia, pues se encuentra sometido a una compresión triaxial, mientras el menos deformable reduce su resistencia debido a las tensiones transversales presentadas en los planos de contacto de ambos materiales, a este proceso se le conoce como fenómeno de junta.

El comportamiento de la mampostería no es lineal, de ser así el material menos resistente se aplastaría, por esta razón, la falla esperada en pilas de mampostería sujetas a carga axial se presenta a través de grietas verticales generadas por las tensiones transversales, inducidas por el material más deformable, el cual, presenta la menor resistencia, aunque también, se han observado fallas debido a los efectos de flexión y esbeltez.

Algunas variables que influyen en la resistencia de la mampostería son:

- La resistencia a compresión axial de los componentes, aunque la resistencia del mortero sólo es importante si es demasiado inferior a la de las piezas.
- La absorción de las piezas, si ésta resulta demasiado alta reduce la resistencia de la mampostería.
- La adherencia y fluidez del mortero.
- La calidad de mano de obra.

Para piezas y morteros de baja resistencia la curva esfuerzo deformación tiende a ser parabólica, de otra manera conserva una pendiente prácticamente constante hasta llegar a la falla. La rigidez de la mampostería generalmente es mayor a la de los componentes por separado. El módulo de elasticidad depende básicamente de la resistencia de la pieza, y el valor disminuye cuando se aplican cargas de manera sostenida, este efecto es más notable en piezas de concreto.

En la prueba de compresión diagonal, como su nombre indica, el murete recibe una carga a compresión a lo largo de una de sus diagonales, durante esta prueba se generan esfuerzos de tensión ortogonales a la dirección de la carga, conduciendo generalmente a la falla del murete a lo largo de una grieta vertical entre las esquinas cargadas.

Para todos los ensayos físicos existen errores e incertidumbres, si bien es cierto que pueden reducirse a través de la repetición constante y mejorando de las técnicas experimentales, las observaciones que hacemos no representan exactamente el proceso que creemos se está llevando a cabo, el resultado incluye un error (Peters, 2001).

Una definición de error es: “diferencia entre el valor exacto de una magnitud y el valor dado por su medida” (Larousse, 2008). Usualmente no conocemos el valor exacto, de otra manera no tendría razón realizar un ensayo (Bevington y Robinson, 2003). Sin embargo, se puede saber cuál debería ser aproximadamente, bien sea por predicciones teóricas o por experimentos anteriores. Estas aproximaciones pueden servir de guía pero se debe determinar sistemáticamente qué tan confiables son los resultados obtenidos.

Las pruebas de pilas y muretes tienen como propósito conocer los valores con los que se calculan los esfuerzos de diseño, en este caso serán obtenidos de acuerdo a las Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Estructuras de Mampostería (NTCM-2004), razón por la cual, es necesario conocer el Coeficiente de Variación, también conocido como Desviación Estándar Relativa.

El coeficiente de variación es una forma de medir la dispersión de una distribución de frecuencia, expresada en porcentaje. Es un factor adimensional definido como el porcentaje de la desviación estándar respecto a la media de un conjunto de datos, se utiliza en distintos campos técnicos y científicos para expresar la precisión de los ensayos (Gao *et al.*, 2013), gracias a que facilita la comparación de variables con diferentes unidades y valores promedio.

La desviación estándar (σ) de una población indica cuánto se desvía cada número individualmente de la media (en cualquier dirección) y se calcula de la siguiente manera:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (X_i - \bar{X})^2}{N}}$$

donde \bar{X} es la media del conjunto y N es el número de datos. Entonces el coeficiente de variación se obtiene con la siguiente expresión:

$$c_m = \frac{\sigma}{\bar{X}}$$

esta medida de dispersión se utilizó siguiendo el método establecido en las NTCM-2004, a fin de que los resultados del estudio fueran comparables a los valores correspondientes indicados en dicho documento.

Se llevó a cabo la fabricación de pilas y muretes a partir de bloques suelo-cemento, de acuerdo a las proporciones indicadas en la normatividad mexicana correspondiente, con el propósito de someterlas a pruebas de compresión y compresión diagonal respectivamente, para conocer las propiedades mecánicas de la mampostería con la finalidad de predecir el comportamiento que tendrá en su etapa de conjunto mediante las resistencias de diseño obtenidas.

4.2. Fabricación de especímenes de prueba

Se fabricaron las pilas y los muretes por un mismo operario, cuidando la verticalidad en una de las caras y nivelando cada pieza al colocarla, con piezas en condiciones saturada de superficie seca, la mezcla para el mortero fue cemento hidráulico-cemento de albañilería-arena en una proporción 0.5:0.5:3, no se midió la cantidad de agua, ésta se fue agregando hasta tener una manejabilidad adecuada, se muestreó y los cubos se ensayaron a compresión el mismo día que fueron ensayadas las pilas.

Cuando se fabrican las piezas con la CINVA-RAM se obtienen prismas lisos, de tal manera que al inicio de la fabricación se presentaron algunos problemas de adherencia entre los bloques y el mortero, para solventar esta eventualidad las cuatro caras que tendrían contacto directo con el mortero se escarificaron, mojando completamente la superficie para rayarla después con un cristal parte del proceso de se ilustra en la figura 4.2.



Figura 4.2. Escarificación de piezas.

Los especímenes se fabricaron siguiendo el criterio de las NTCM-2004 del RCDF; para las pilas, por ejemplo, se recomienda que sean producidas con tres piezas como mínimo, a fin de obtener una relación de aspecto cercana a cuatro, lo que genera ventajas experimentales, tales como:

- a) El modo de falla a compresión axial es muy semejante al de un muro de mampostería a escala real.
- b) Los efectos de restricción de los cabezales de aplicación de carga no interfieren con las resistencias máximas obtenidas durante los ensayos a compresión axial del espécimen.
- c) La fabricación, manipulación y el ensayo de las pilas son más sencillos.

Para este caso una pila de tres piezas presentó una relación de aspecto prácticamente de 4, ya que las piezas son de 12 X 15 X 32 cm, y con juntas aproximadamente de un centímetro se obtuvieron pilas de 12 x 47 x 32 cm.

Por otra parte, los muretes fueron sensiblemente cuadrados con una relación de aspecto cercana a cuatro, el largo corresponde a pieza y media, las juntas de mortero fueron aproximadamente de un centímetro de espesor, resultando entonces muretes de 12 X 47 X 49, aproximadamente. Para su construcción también se saturaron las piezas en agua antes de la fabricación, se cuidó verticalidad en una de las caras y se nivelaron las piezas al colocarlas. Detalles de la fabricación de especímenes quedan plasmados en la figura 4.3.

Pilas y muretes permanecieron 28 días a temperatura ambiente, sin exponerse a la intemperie ni a ningún tipo de proceso de curado, después de este periodo se sometieron a la prueba de compresión axial o compresión diagonal, según correspondía.

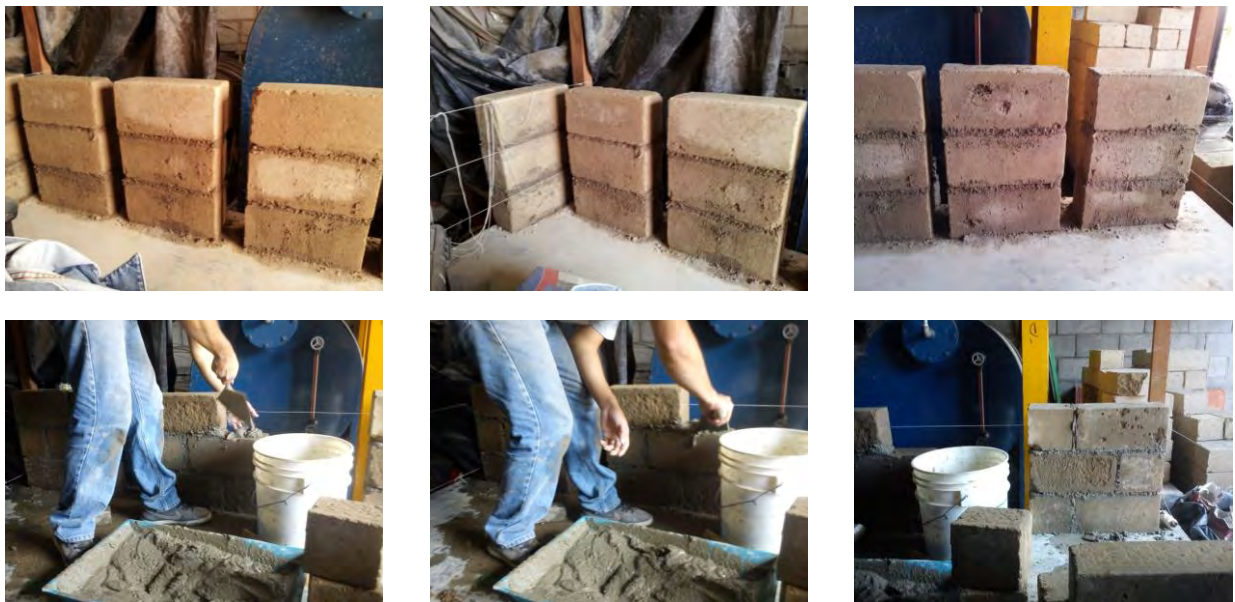


Figura 4.3. Elaboración de pilas y muretes.

4.3. Descripción de las pruebas

Se llevaron a cabo pruebas a compresión de cubos de mortero, pilas y muretes (compresión diagonal) en la máquina universal con una velocidad de carga que clasifica a la prueba como estática (0.006 mm/seg), sin impacto ni pérdida de carga. Al inicio de cada ensaye la platina superior bajó lentamente hasta aproximarse a un par de milímetros del espécimen, posteriormente se aplicó la velocidad mencionada hasta lograr el acomodo de los cabezales. Todas las probetas se cargaron mediante cabezales metálicos suficientemente rígidos para llevar a cabo la aplicación de la carga.

Debido a la naturaleza del material de pilas y muretes resultó muy complicado el cabeceo, como se mencionó en el capítulo anterior; el cabeceo de bloques se intentó con distintos materiales sin obtener resultados satisfactorios. La opción para promover una carga homogénea, durante el ensaye a compresión de las pilas, fue colocar una placa o platina de 5/8" de espesor entre éstas y el cabezal superior de la máquina universal, en la base se alineó la probeta utilizando las marcas presentes en el cabezal inferior, sin colocar otro dispositivo, como puede apreciarse en la figura 4.4.

Por otro lado, para los muretes se utilizaron placas de neopreno con 1/4" de espesor entre los cabezales y el murete, con un ancho de 15 cm, igual al de los cabezales; entre el cabezal de carga inferior y el cabezal inferior de la máquina universal se colocó una placa delgada con espesor variable (cuña) para nivelar el murete, procurando una carga completamente axial, el arreglo se muestra en la figura 4.5.



Figura 4.4. Prueba a compresión de pilas.

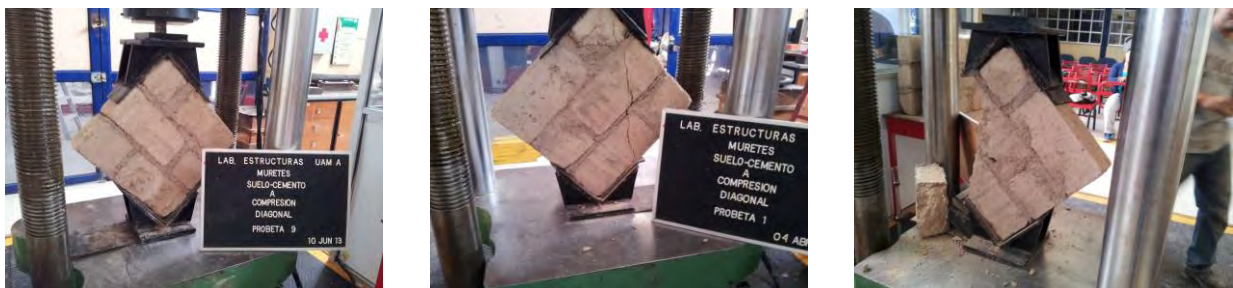


Figura 4.5. Prueba a compresión diagonal en muretes.

4.4. RESULTADOS

4.4.1 Resistencia de diseño a compresión del mortero f_j^*

Durante la construcción de pilas y muros se tomaron muestras del mortero utilizado para la fabricación de tres cubos de 5 x 5 x 5 cm durante cada sesión para un total de seis cubos. La obtención de su resistencia a compresión se obtuvo mediante la siguiente ecuación:

$$f_j = \frac{P}{A} = \frac{P}{25}$$

donde P es la carga axial máxima aplicada al cubo y S es el área de la sección transversal en centímetros cuadrados, en este caso 25. La resistencia de diseño se calculó con la ecuación que se presenta a continuación, contenida en las NTCM-2004. Esto es:

$$f_j^* = \frac{\bar{f}_j}{(1+2.5c_j)}$$

donde \bar{f}_j es la media de la resistencia a compresión y C_j es el coeficiente de variación de la resistencia a compresión de los cubos.

Los resultados obtenidos después de los ensayos a compresión del mortero se muestran en la tabla 4.1.

Tabla 4.1. Esfuerzos a compresión para cubos de mortero

PROBETA	CARGA MAXIMA (kg)	ESFUERZO f_j (kg/cm ²)	$(X_i - \bar{X})^2$
C-1	2672	107	199.19
C-2	3346	134	165.04
C-3	2754	110	117.36
C-4	2921	117	17.25
C-5	2987	119	2.29
C-6	3469	139	315.65
Promedios		121.0	136.13

A partir de los datos en la tabla se obtiene la desviación estándar, utilizando la ecuación mencionada anteriormente, como:

$$\sigma = \sqrt{136.13} = 11.67$$

Y con ésta, el coeficiente de variación, sustituyendo el resultado obtenido y el promedio de la resistencia a compresión de los cubos en la ecuación correspondiente:

$$c_j = \frac{11.67}{121} = 0.10$$

El valor obtenido para el coeficiente de variación a partir de los resultados experimentales resulta inferior al mínimo recomendado en las NTCM-2004, que es 0.20; con este último valor se calcula el esfuerzo de diseño:

$$f_j^* = \frac{\bar{f}_j}{(1+2.5c_j)} = \frac{121}{(1+2.5*0.2)}$$

Como resultado para el valor de la resistencia a compresión para diseño se tienen **80.7 kg/cm²**, lo que clasifica al mortero como Tipo II.

4.4.2 Resistencia de diseño a compresión de los bloques f_p^*

La resistencia de diseño a compresión de las piezas f_p^* se calculó de acuerdo a las NTCM-2004, utilizando los datos obtenidos en el capítulo 2 referentes a los resultados de la evaluación de esfuerzo de compresión en bloques con suelo triturado-cemento. En la tabla 4.2 se reproducen los datos de la tabla 2.11.

**Tabla 4.2. Esfuerzos a compresión para bloques
suelo-cemento**

BLOQUE	CARGA APLICADA (kg)	ESFUERZO f_p (kg/cm ²)	$(X_i - \bar{X})^2$
1	5650	15	17.45
2	9469	25	33.27
3	9366	24	30.25
4	8666	23	13.52
5	8980	23	20.20
6	7989	21	3.66
7	5845	15	13.46
8	6656	17	2.43
9	6706	17	2.04
10	6392	16	5.04
11	7109	19	0.14
12	8010	21	3.88
13	7610	20	0.86
14	5909	15	12.27
15	6856	18	1.07
16	5250	14	27.23
17	8487	22	10.31
18	8351	22	8.16
19	5232	14	27.73
20	6547	17	3.39
Promedios		19	11.82

Análogo al procedimiento realizado para los cubos de mortero se calcula el coeficiente de variación, sustituyendo los resultados en las ecuaciones mencionadas para tal propósito, resultando:

$$c_p = \frac{\sqrt{11.82}}{19} = \frac{3.44}{19} \approx 0.18$$

El coeficiente de variación obtenido a partir de los resultados experimentales nuevamente resulta inferior al valor mínimo que sugieren las NTCM-2004, 0.20, considerando una producción mecanizada, gracias al uso de la CINVA-RAM, y bajo un control de calidad como el requerido en la norma NMX-C-404-ONNCCE. Con el valor mínimo establecido en las NTCM-2004 se calcula el esfuerzo de diseño:

$$f_p^* = \frac{\bar{f}_p}{(1+2.5c_p)} = \frac{19}{(1+2.5*0.2)}$$

Como resultado para el valor de la resistencia a compresión para diseño se tienen **12.6 kg/cm²**.

4.4.3 Resistencia de diseño a compresión de las pilas f_m^*

En la tabla 4.3 se registran los resultados obtenidos en las pruebas a compresión de pilas, para obtener el esfuerzo se utilizó el valor del área bruta de las piezas, 384 cm².

Tabla 4.3. Resultado de las pruebas a compresión de pilas.

PROBETA	CARGA MAXIMA (kg)	ESFUERZO V_m (kg/cm ²)	$(X_i - \bar{X})^2$
P-1	6188	16	21.81
P-2	2245	6	31.34
P-3	2878	7	15.60
P-4	2296	6	29.88
P-5	4367	11	0.01
P-6	5900	15	15.36
P-7	5949	15	16.38
P-8	5578	15	9.49
P-9	4153	11	0.40
Promedios		11.44	15.59

Similar a lo realizado para los cubos de mortero y los bloques suelo-cemento se calcula el coeficiente de variación, sustituyendo los resultados de la tabla 4.3 en las ecuaciones correspondientes:

$$c_m = \frac{\sqrt{15.59}}{11.44} = \frac{3.95}{11.44} \approx 0.34$$

El coeficiente de variación resulta de 0.34, superior al valor mínimo establecido en las NTCM-2004, que es 0.15, sustituyendo el valor obtenido en la fórmula que aparece en las NTCM-2004:

$$f_m^* = \frac{\overline{f_m}}{(1+2.5c_m)} = \frac{11.44}{(1+2.5*0.34)}$$

Se obtiene como valor de la resistencia a compresión para diseño **6.1 kg/cm²**. La tabla 4.4 es la reproducción de la tabla 2.8 contenida en las NTCM-2004, en ella se presentan valores indicativos para distintos tipos de pieza en combinación con tres tipos de mortero, éstos se emplean cuando no se realizan ensayos experimentales.

Tabla 4.4 Resistencia de diseño a compresión de la mampostería, f_m^* , para algunos tipos de piezas, sobre área bruta.

Tipo de pieza	f_m^* , kg/cm ²		
	Mortero I	Mortero II	Mortero III
Tabique de barro recocido ($f_p^* \geq 60$ kg/cm ²)	15	15	15
Tabique de barro con huecos verticales ($f_p^* \geq 120$ kg/cm ²)	40	40	30
Bloque de concreto (pesado ¹) ($f_p^* \geq 100$ kg/cm ²)	20	15	15
Tabique de concreto (tabicón) ($f_p^* \geq 100$ kg/cm ²)	20	15	15

¹ Con peso volumétrico neto, en estado seco, no menor que 2000 kg/m³.

Puede notarse que la resistencia obtenida con los bloques suelo-cemento en las pruebas a compresión de las pilas es mucho más baja que cualquiera de las mostradas en la tabla anterior, aunque congruente, recordemos que las piezas tuvieron una resistencia $f_p^* = 12.6$ kg/cm², mucho menor al mínimo que presenta la tabla, correspondiente a los tabiques de barro recocido.

4.4.4 Resistencia de diseño a compresión de los muretes V_m^*

La tabla 4.5 contiene los resultados obtenidos en las pruebas a compresión diagonal de muretes, para obtener el esfuerzo se utilizó el área de la diagonal de los muretes, 815 cm², aproximadamente.

Siguiendo el procedimiento de los apartados anteriores se calcula el coeficiente de variación:

$$c_v = \frac{\sqrt{0.42}}{3.2} = \frac{0.65}{3.2} \approx 0.20$$

Tabla 4.5. Resultado de las pruebas a compresión diagonal de muretes.

PROBETA	CARGA MAXIMA (kg)	ESFUERZO V_m (kg/cm ²)	$(X_i - \bar{X})^2$
M-1	2658	3	0.00
M-2	3932	5	2.63
M-3	2589	3	0.00
M-4	2790	3	0.05
M-5	2818	3	0.06
M-6	2915	4	0.14
M-7	2039	3	0.49
M-8	2606	3	0.00
M-9	2185	3	0.27
M-10	2330	3	0.12
M-11	1856	2	0.86
PROMEDIO		3.2	0.42

El coeficiente de variación es 0.20, igual al valor mínimo establecido en las NTCM-2004, que es 0.20, sustituyendo estos valores en la ecuación de las NTCM-2004:

$$V_m^* = \frac{\bar{V}_m}{(1+2.5c_v)} = \frac{3.2}{(1+2.5*0.2)}$$

Obtenemos el valor de la resistencia a compresión diagonal para diseño de **2.1 kg/ cm²**, un valor superior a los indicativos, mostrados en la tabla 2.9 de las NTCM-2004 para tabiques de barro con huecos verticales con mortero tipo II si no se realiza este tipo de ensayos, tabla 4.6.

Tabla 4.6 Resistencia de diseño a compresión diagonal para algunos tipos de mampostería sobre área bruta.

Pieza	Tipo de Mortero	v_m^{*1} , kg/cm ²
Tabique de barro recocido ($f_p^* \geq 60$ kg/cm ²)	I II y III	3.5 3
Tabique de barro con huecos verticales ($f_p^* \geq 120$ kg/cm ²)	I II y III	3 2
Bloque de concreto (pesado ²) ($f_p^* \geq 100$ kg/cm ²)	I II y III	3.5 2.5
Tabique de concreto (tabicón) ($f_p^* \geq 100$ kg/cm ²)	I II y III	3 2

¹ Cuando el valor de la tabla sea mayor que $0.8\sqrt{f_m^*}$ en kg/cm² se tomará este último valor como v_m^*

² Con peso volumétrico neto, en estado seco, no menor que 2000 kg/m³.

Con los datos obtenidos en los cálculos anteriores se pueden obtener otros parámetros de la mampostería:

- La resistencia al aplastamiento

$$0.6f_m^* = 0.6 \cdot 6.1 = 3.66 \text{ kg/cm}^2$$

- El módulo de elasticidad, E_m :

- a) Para cargas de larga duración

$$600 f_m^* = 600 \cdot 6.1 = 3660 \text{ kg/cm}^2$$

- b) Para cargas de corta duración

$$350 f_m^* = 350 \cdot 6.1 = 2135 \text{ kg/cm}^2$$

- El módulo de cortante

$$G_m = 0.4 E_m, \text{ esto es:}$$

- a) Para cargas de larga duración

$$G_m = 0.4 \cdot 3660 = 1464 \text{ kg/cm}^2$$

- b) Para cargas de corta duración

$$G_m = 0.4 \cdot 2135 = 854 \text{ kg/cm}^2$$

CAPÍTULO 5. ENSAYE DE MURO

5.1. Antecedentes

Los muros estructurales son esenciales en edificios de mampostería para resistir el efecto de la carga axial producida por cargas gravitacionales, además de efectos de flexión y cortante, dentro y fuera de su plano, debido a fuerzas laterales que son provocadas por acciones como el viento, sismos, impactos y cargas verticales excéntricas, entre otras.

En un edificio de mampostería sujeto a cargas sísmicas se desarrollan fuerzas de inercia en los muros y losas, éstas últimas también llamadas diafragmas, son las encargadas de transmitir las fuerzas laterales al sistema de muros verticales (muros de cortante) que resiste tales cargas (Meli *et al.*, 2011).

Las fuerzas de inercia producidas durante un sismo son proporcionales a las masas de los componentes estructurales y a la aceleración correspondiente al nivel en que se encuentran respecto a la base del edificio. Un edificio con un buen diseño y construcción ofrecerá un patrón de cargas confiable, y se encargará de transmitir las fuerzas a través de los sistemas de piso o diafragmas, desde la azotea a la cimentación, como se observa en la figura 5.1 (Flores, 2008).

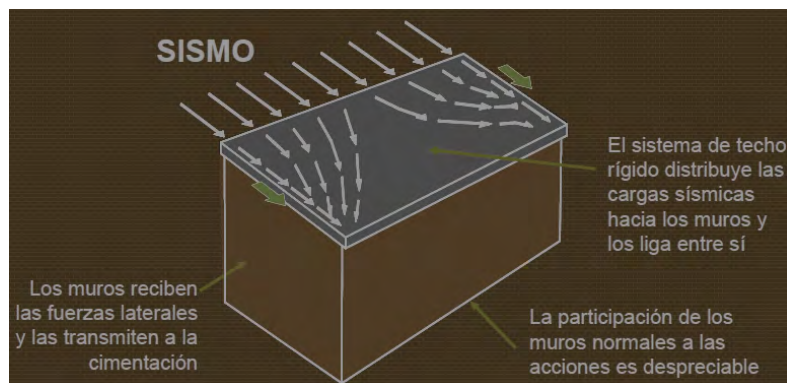


Figura 5.1. Transmisión de las fuerzas inerciales inducidas por el sismo

Los muros de mampostería confinada consisten de tableros de mampostería no reforzada delimitados por elementos de concreto reforzado (castillos y dalas); presentan un comportamiento muy diferente a los muros de mampostería no reforzada y son una buena alternativa en construcciones de baja altura aún en zonas de alta sismicidad, siempre que cuenten con elementos confinantes adecuadamente detallados (Tena y Miranda 1999).

Este confinamiento mejora sustancialmente el desempeño de la mampostería después de que se presenta el primer agrietamiento diagonal, dando lugar a la redistribución de esfuerzos que origina el puntal de compresión, en ese momento aumenta la demanda del cortante en el extremo

de los castillos (Mendoza *et al.*, 2004), exhibiendo pérdidas de resistencia y rigidez que evolucionan hasta la falla del muro (Zúñiga y Terán, 2008).

El mecanismo de falla dista bastante de ser simple, por el contrario, si los castillos logran resistir la demanda de cortante, el muro puede soportar cargas laterales adicionales y deformaciones mayores gracias a la articulación que se forma en los extremos de los castillos, y que se manifiesta con grietas de una inclinación cada vez menor, dependiendo de la resistencia del castillo (Meli, 1973). En este mecanismo, la fuerza lateral se equilibra con la fuerza de fricción, con el anclaje mecánico a lo largo de la grieta y con la fuerza cortante de los castillos en los extremos de la grieta (Mendoza *et al.*, 2004).

El ensaye de un muro a escala real sometido a cargas laterales produce esfuerzos cortantes y de flexión simultáneamente, debido a esta flexión, los esfuerzos verticales disminuyen en un extremo del muro y se incrementan en el otro, donde se puede observar una falla por aplastamiento asociada a una deformación del acero de refuerzo una vez que se ha perdido el confinamiento, de tal manera que, la fuerza cortante que produce el agrietamiento en el muro es menor si se compara a la generada en un ensaye a compresión diagonal en muretes (Mendoza *et al.*, 2004). Algunos tipos de falla se pueden observar en la figura 5.2.

En general, los muros a cortante están sujetos a cargas en cada entrepiso, a través del diafragma correspondiente, como se ilustra en la figura 5.3 donde la distribución de fuerzas laterales simula los efectos de un sismo. Puede apreciarse que la distribución de fuerzas es similar a la que se presenta en una viga en cantilever empotrada en la base, con una fuerza cortante V igual a la suma de las fuerzas horizontales actuantes, un momento de magnitud M debido a la acción de la fuerza cortante lateral V multiplicada por la altura h_e correspondiente y la fuerza axial P equivalente a las fuerzas axiales debidas a las cargas gravitacionales (Anderson y Brzev, 2004).

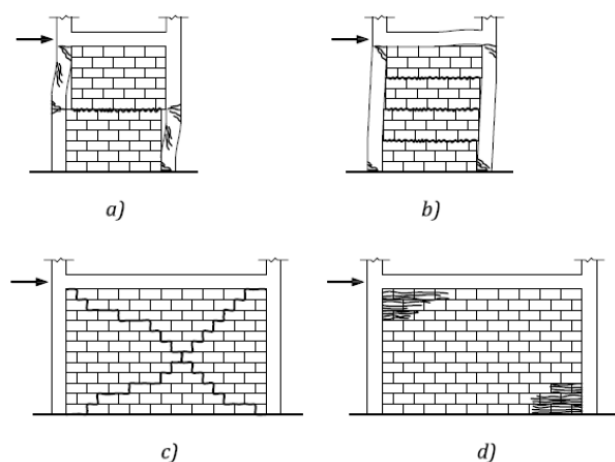


Figura 5.2. Tipos de falla en muros a cortante.
a) y b) Falla por deslizamiento (Tomazevic, 1999).
c) Falla por tensión diagonal (Crisafulli, 1997).
d) Falla por compresión en las esquinas (Crisafulli, 1997).

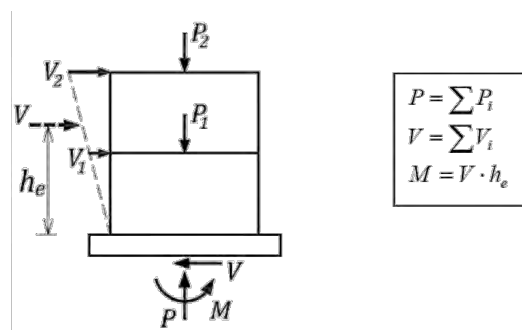


Figura 5.3. Distribución de cargas en muros a cortante

Es necesario recordar que el presente estudio tiene un carácter de aproximación a las propiedades de los bloques suelo-cemento, en el que inicialmente se pretende evaluar la viabilidad de continuar con una segunda etapa en la que se involucre un protocolo de cargas a una serie de muros y se conozcan las características de degradación de rigidez y de disipación de energía, entre otros aspectos.

En esta parte del estudio se observó el comportamiento de un muro a escala real de 2 x 2 m construido con bloques suelo-cemento ante cargas laterales eliminando los efectos de flexión que pudieran presentarse, es decir, que el muro trabajó solamente a cortante. Aunque no se pretende que los bloques de suelo-cemento sean utilizados en zonas de alta vulnerabilidad sísmica, el análisis bajo cargas laterales en este estudio es necesario para garantizar la integridad de la estructura ante los efectos de cargas laterales que resultan impredecibles.

La intención es, como ya se ha mencionado, que el material sea utilizado para mejorar las condiciones de vivienda en comunidades rurales de bajos recursos, un importante sector de la población que generalmente queda desprotegido ante los embates de la naturaleza, lo que representa la pérdida total del patrimonio de un gran número de familias.

5.2. Fabricación de marco de carga

Para evaluaciones similares a la que se llevó a cabo, de someter un muro escala 1:1 ante cargas laterales, eliminando los efectos de flexión y bajo la acción de una carga axial vertical que simule la participación de las cargas gravitacionales en el espécimen, se presentan en la literatura marcos de carga como el que se muestra en la figura 5.4, constituidos básicamente por los mismos elementos:

- Una viga o losa de cimentación anclada al piso de arranque
- Columnas articuladas
- Cabezal de carga o losa superior
- Gatos hidráulicos o actuadores para aplicar la carga lateral
- Elementos que proporcionen carga axial, usualmente resortes

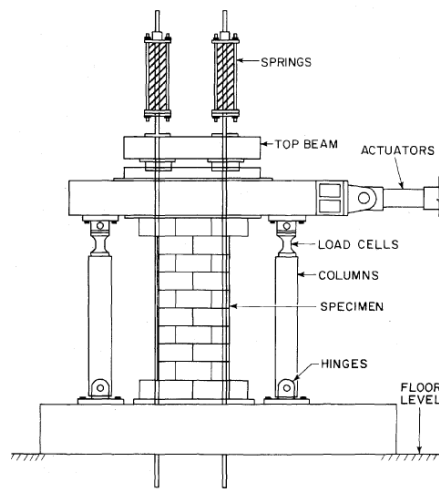


Figura 5.4. Marco de carga típico para pruebas de muros a cortante.

El arreglo propuesto para el dispositivo de carga para el estudio es similar a los mencionados, excepto por la forma en que se aplica la carga axial, en lugar de ser transmitida a través de barras distribuidas a lo largo del muro, el cabezal es suficientemente rígido para transmitir la carga aplicada mediante gatos hidráulicos de doble acción incluidos en las columnas laterales.

Las celdas de carga se colocaron en los extremos superiores de dichos gatos, además, con la finalidad de alinear correctamente los componentes del marco tanto verticalmente como respecto al eje del muro en el plano horizontal, las placas de conexión cuentan con agujeros alargados, y finalmente, como se muestra en la figura 5.5, la carga lateral se aplicó mediante un actuador sujeto directamente al cabezal.

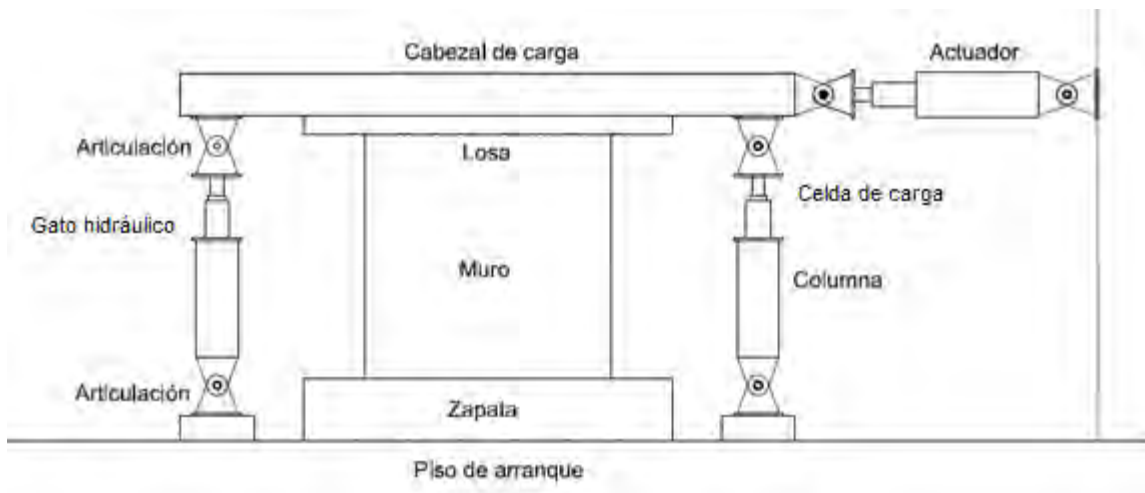


Figura 5.5. Marco de carga utilizado en el estudio.

5.3. Fabricación del muro

El manejo de un muro de prueba es complicado, trasladarlo del lugar de fabricación al sitio de ensaye implica un riesgo elevado, de tal manera, que al tratarse de un solo espécimen se fabricó en el lugar en donde se ensayaría más adelante para evitar ese tipo de inconvenientes.

Inicialmente se coló la losa de piso, o viga de arranque, con una dimensión de 80X240X30 cm y una separación de anclas de 65 cm al centro, determinada por el piso de arranque en el marco de carga del laboratorio, en el armado de la losa se sujetaron las varillas para los castillos como puede verse en la figura 5.6.

Una vez fraguado el concreto de la losa se colocó en la posición de la prueba para continuar con la preparación, la probeta se instrumentó en las esquinas inferiores del armado de los castillos con la intención de obtener datos del comportamiento histerético que presentaría el muro, a fin de valorar numéricamente la degradación del muro ante cargas cíclicas.

En la figura 5.7 puede observarse el acabado que se logró en el refuerzo para la colocación de los medidores de deformación (strain gages) y algunos detalles de la instrumentación.



Figura 5.6. Losa de piso.

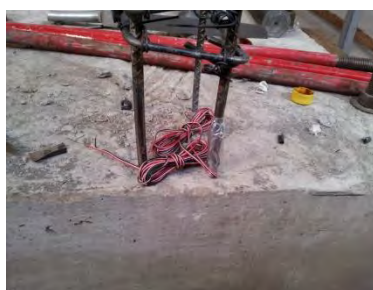


Figura 5.7. Instrumentación del armado.

Para la construcción del muro se determinó el eje a partir del centro de la columna del marco de carga que serviría para sostener el actuador, aunque el armado de los castillos se colocó al centro de la losa, la localización del eje se cuidó en todo momento para evitar cualquier efecto de torsión que pudiera presentarse.

Las juntas de mortero fueron de poco más de 1 cm de espesor, se saturaron las piezas en agua antes de la fabricación, se cuidó la verticalidad en una de las caras y se nivelaron las piezas al colocarlas, todo esto realizado por un operario altamente calificado, los detalles de la fabricación se muestran en la figura 5.8.

El concreto utilizado en la construcción de los elementos de confinamiento, y el de las losas fue proporcionado para una obtener resistencia de $f'c=200 \text{ kg/cm}^2$, con el propósito de superar la resistencia mínima de $f'c=150 \text{ kg/cm}^2$ para castillos externos que establecen las Normas Técnicas para Diseño y Construcción de Estructuras de Mampostería (NTCM-2004); tratando de simular las condiciones reales de construcción de los elementos de confinamiento, no se llevó a cabo un control de mezcla refinado, es decir, sin hacer un análisis granulométrico de los agregados ni de controlar la relación agua-cemento, sin embargo, se procuró un revenimiento de 12 cm para evitar una cantidad excesiva de agua.

Se tomaron muestras de concreto para la elaboración de dos cilindros estándar (testigos) para ensayarlos a compresión más adelante, estos cilindros no se sometieron a ningún proceso de curado y se mantuvieron bajo las mismas condiciones a las que estuvo sujeto el muro.

Los castillos se colaron el mismo día de la fabricación del muro, dada la vulnerabilidad de este ante cargas fuera de su plano, 14 días después fue colada la losa, en la que además de la cimbra se

colocó un marco externo para soportar la carga del cabezal mediante un polipasto y cuerdas apropiadas para carga (eslingas o slings) como medida adicional de seguridad, esto puede observarse en la figura 5.9.

Durante el colado de castillos y losa se tomaron muestras del concreto para la elaboración de seis cilindros más y se ensayaron en la misma fecha en que se llevó a cabo el ensaye del muro junto con los dos obtenidos del concreto de la losa inferior o viga de arranque.



Figura 5.8. Construcción del muro.



Figura 5.9. Colado de losa.

5.4. Descripción de las pruebas

El muro fue pintado de blanco y se marcó siguiendo el protocolo habitual para localizar y marcar el agrietamiento en las diferentes etapas del ciclo de carga, como puede verse en la figura 5.10, donde se observa también el cableado de la instrumentación colocada en las esquinas de los castillos.

Nótese que el marco de seguridad no se retiró en ningún momento, para evitar cualquier efecto que la carga gravitacional de la losa pudiera incidir en el muro, aunque tampoco intentó elevarse, lo que habría creado una carga de tensión en el muro.

El ensaye tenía como propósito apegarse al protocolo establecido en el Apéndice A de las NTCM, sometiendo al muro a ciclos de carga, primero ante cargas dadas (hasta la carga de agrietamiento), y después a deformaciones (distorsiones angulares) de manera ascendente.

El arreglo final se muestra en la figura 5.11, justo antes de hacer el ensamble del actuador al cabezal de carga, sin embargo, minutos después quedó descartada la idea de hacer un ensaye numérico y registrar el comportamiento histerético del muro, ya que, debido a una falla en el equipo hidráulico que controla los actuadores se aplicó un desplazamiento de 8 cm en lugar de los 6 mm que se contemplaban como máximo para la precarga, un día antes de la fecha programada para el ensaye del muro.

Por este motivo, los resultados son de carácter cualitativo, ya que, aún no se conectaba la consola a la instrumentación colocada en el armado y tampoco se registró ningún dato en la computadora que controla el equipo hidráulico.



Figura 5.10. Colocación de cuadrícula en el muro.

5.5. Resultados

5.5.1 Resistencia de diseño a compresión de testigos de concreto f'_c

En la tabla 5.1 se muestran los datos obtenidos en el ensaye de los testigos de concreto, con estos valores se obtuvo una resistencia media $\overline{f'_c} = 173 \text{ kg/cm}^2$, valor aceptable si se considera que las

NTCM solamente indican como límite inferior una resistencia $f'_c=150 \text{ kg/cm}^2$, siendo este el valor más bajo obtenido en las pruebas.



Figura 5.11. Arreglo final para la prueba.

Tabla 5.1. Resistencia a compresión en testigos de concreto.

Cilindro Número	Carga (kg)	Esfuerzo (kg/cm ²)
1	33669	191
2	30127	170
3	26476	150
4	27360	155
5	31888	180
6	29630	168
7	32154	182
8	33360	189

5.5.2 Prueba del muro ante cargas laterales

A continuación se presentan imágenes tomadas después del desplazamiento inicial que recibió el muro, 3 mm, con este desplazamiento se calcula la distorsión inicial impuesta en el muro.

$$DI_{\min}(\%) = \frac{0.03}{200} = 0.00015$$

Se presentaron algunas grietas en el muro, figura 5.12, en dos de los extremos de los castillos aparecieron algunas pero demasiado pequeñas para ser observadas en fotografía.

La grieta principal se dio por deslizamiento, aunque también se presentan diagonales en los cuatro vértices. Se trataba solo de precargar el muro, así que, se indicó la aplicación del siguiente desplazamiento, 6 mm, después se marcarían y se registrarían todas las grietas con el número 1 para señalarlas como pertenecientes a la precarga en conjunto.

Finalmente se aplicó un desplazamiento de 8 cm, valor con el que se calcula la distorsión máxima a la que fue sometido el muro, de la siguiente manera:

$$DI_{m\acute{a}x}(\%) = \frac{8.0}{200} = 0.04$$

Esta deformación está por debajo de la requerida para el estado límite de servicio, como se observa en los valores de referencia para los estados límite de la mampostería confinada contenidos en la tabla 5.2.



Figura 5.12. Agrietamiento después del primer desplazamiento.

Tabla 5.2. Estados límite para muros de mampostería confinada (Astroza y Schmidt, 2004)

Estado Límite	Distorsión (%)
Estado límite de servicio	0.05
Estado límite operacional	0.10
Estado límite de daño controlado	0.17
Estado límite de resistencia	0.22
Estado límite ultimo 0.44	0.44

El agrietamiento siguió el patrón inicial, además de una grieta por desplazamiento cerca del extremo superior, algunas grietas que se generaron a lo largo de uno de los castillos y en el extremo superior del otro como se muestra en la figura 5.13.

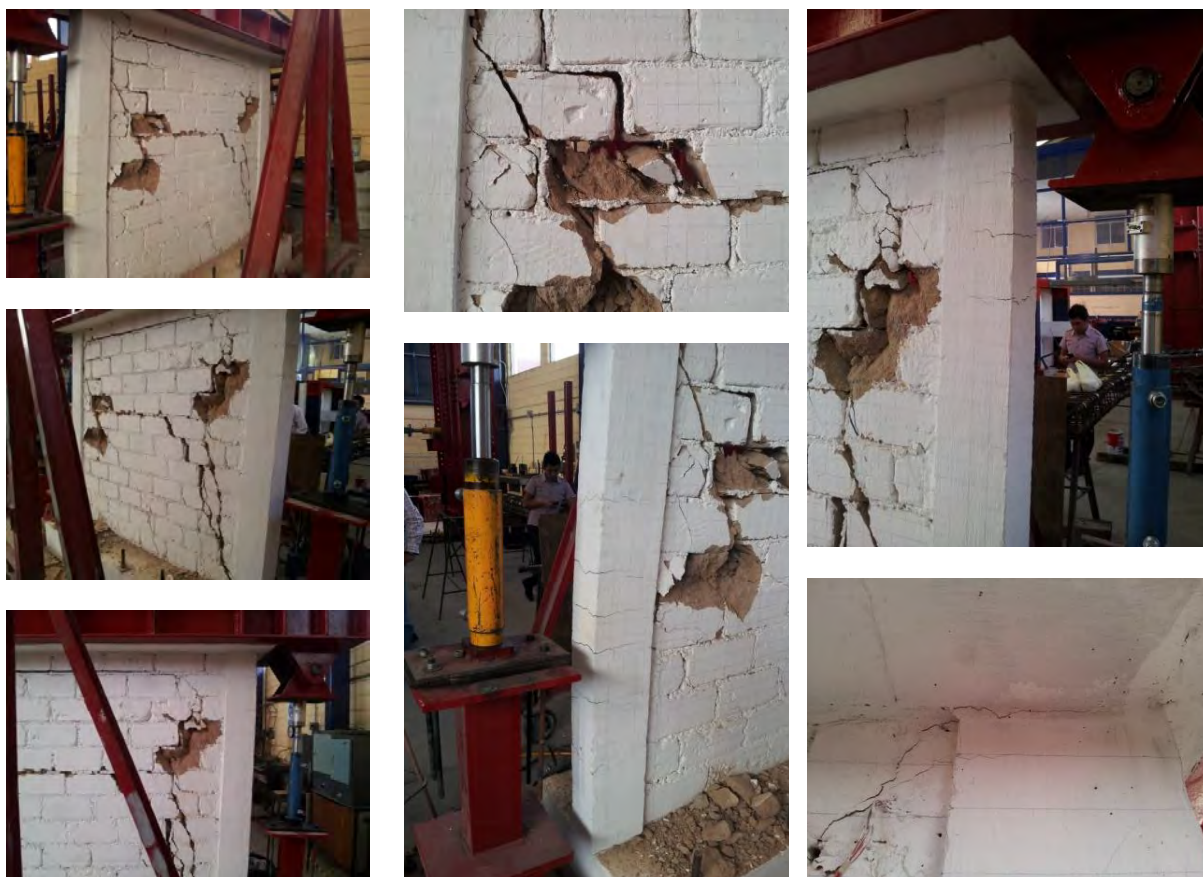


Figura 5.13. Agrietamiento final.

CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES

Para la fabricación de bloques de suelo estabilizado presentados en este estudio, inicialmente se evaluó el suelo obtenido en una localidad cercana a la Ciudad de México; aunque sus características naturales resultaron similares a los determinados como óptimos en la literatura, fue necesario reconstituirlo triturando las partículas mediante un rodillo o barra metálica.

Se contempló la inclusión de fibras de agave para mejorar las cualidades de la mampostería, alternativa que fue descartada, principalmente porque no se logró un peso volumétrico igual o mayor a 1.7 ton/m^3 , determinado como mínimo, de acuerdo a lo observado en los ensayos, para obtener una resistencia a compresión similar a la de otras mezclas que si alcanzaron esta densidad.

Fueron fabricados bloques de suelo con cemento y con cal como material aglutinante, finalmente se tomó la decisión de eliminar la mezcla con cal, ya que presentó un desempeño pobre en las pruebas de durabilidad, aunque considerada severa, las piezas con cemento tuvieron un comportamiento sustancialmente mejor.

Los costos ambientales se compararon cualitativamente, entre este tipo de mampostería y la mampostería tradicional, demostrando las ventajas que se tiene al elegir bloques de suelo estabilizado como material de construcción, fabricada principalmente de forma artesanal.

Se llevaron a cabo pruebas a compresión simple y a compresión diagonal en pilas y muretes respectivamente, contruidos con los bloques fabricados de la mezcla suelo-cemento definitiva. Durante las pruebas, los especímenes mostraron un comportamiento adecuado, conservaron su integridad y no presentaron problemas de adherencia.

Los resultados presentan valores congruentes a las NTCM-2004, valores de diseño bajos para piezas de baja resistencia, sin embargo, el resultado para las pruebas de compresión diagonal es alentador, si bien es bajo, también es cierto que resulta similar al permitido para otro tipo de piezas si no se realizan las pruebas correspondientes.

Podemos inferir con los datos de las pruebas realizadas hasta ahora que es viable construir con los bloques suelo-cemento pertenecientes al presente estudio, toda vez que la mampostería ha mostrado integridad ante las cargas a compresión y compresión diagonal aplicadas, lo que hace pensar en la posibilidad de un diseño formal para una edificación de baja altura y en una zona poco vulnerable sísmicamente con este tipo de material de construcción.

El muro construido con bloques suelo cemento fue sometido a un desplazamiento lateral, utilizando el marco de carga construido para tal efecto. No fue posible implementar el protocolo establecido en el Apéndice A de las NTCM-2004; sin embargo, a pesar del inconveniente que se presentó durante la precarga, puede decirse que la mampostería del estudio tuvo un comportamiento satisfactorio de acuerdo al objetivo del ensaye: determinar la integridad del

muro de mampostería fabricado con los bloques suelo-cemento que son motivo del presente estudio.

Lo que puede concluirse de la prueba y del comportamiento del muro es que los bloques no fueron aplastados por el concreto, este comportamiento representa un desempeño positivo y deja abierta la posibilidad de trabajar con el material en pruebas posteriores para obtener datos numéricos que permitan evaluar adecuadamente el comportamiento de la mampostería de bloques suelo-cemento.

Con base en el comportamiento que presentó el muro se sugiere realizar nuevas pruebas, no a uno sino a una serie de muros, sometiéndolos al protocolo establecido en el Apéndice A de las NTCM-2004, con la intención de conocer parámetros de análisis y diseño, definir distorsiones e índices de daño asociados, características de degradación de rigidez y de disipación de energía, entre otros aspectos. A partir de esto, será posible establecer criterios para la evaluación y diseño de edificaciones construidas con este tipo de mampostería.

BIBLIOGRAFÍA

Anderson, D. y Brzev, S. (2009). *Seismic Design Guide for Masonry Buildings*. Canadian Concrete Masonry Producers Association.

APNMX-C- 415 2002–ONNCCE. *Determinación de la Resistencia a Compresión y el Módulo de Elasticidad de Pilas de Mampostería de Barro y de Concreto*. Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación. México.

APNMX-C-416-2002-ONNCCE. *Industria de la Construcción – Determinación de la Resistencia a Compresión Diagonal y de la Rigidez a Cortante de Muretes de Mampostería de Barro y de Concreto*. Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación. México.

Arroyo, D., Ordaz, M. y Teran, A. (2012). *Consideración de Pérdidas Ambientales en el Diseño Sísmico de Edificaciones*. Sociedad Mexicana de Ingeniería Estructural, XVIII Congreso Nacional de Ingeniería Estructural, Acapulco, Gro., pp. 15.

Asif, M., Muneer, T. y Kelley, R. (2007). *Life Cycle Assessment: a Case Study of a Dwelling Home in Scotland*. Building and Environment, 42(3), pp. 1391–1394.

Astroza, M. y Schmidt, A. (2004). *Capacidad de Deformación de Muros de Albañilería Confinada para Distintos Niveles de Desempeño*. Revista de Ingeniería Sísmica. (70), pp. 59-75.

Bevington, P. y Robinson, D. (2003). *Data Reduction and Error Analysis for the Physical Sciences*. Third edition. McGraw Hill Higher Education.

Blondet, M., Villa, G. y Brzev, S. (2011). *Earthquake-Resistant Construction of Adobe Buildings: A Tutorial*. Second Edition. Earthquake Engineering Research Institute, Oakland, California, and IAEE, Tokyo, Japan. (EERI adobe tutorial)

Bryan, A. (1988). *Soil/Cement as Walling Material-I. Stress/Strain Properties*. Building and Environment, Great Britain, 23 (4), pp. 321-330

Buchanan, A. y Honey, B. (1994), *Energy and Carbon Dioxide Implications of Building Construction*. Energy and Buildings, 20 (3), pp. 205–217.

Chen, G. (1995). *Generalized Log-Normal Distributions With Reliability Application*. Computational Statistics and Data Analysis, 19(3), pp. 309–319.

Clarkson, R., y Deyes, K. (2002). *Estimating the Social Cost of Carbon Emissions*. Government Economic Service, Great Britain. Department for Environment, Food & Rural Affairs. HM Treasury London, working paper 140.

Cook, D., Pama, R. y Paul, B. (1977). *Rice Husk Ash-Lime-Cement Mixes for use in Masonry Units*. Building and Environment, Great Britain, 12(4), pp. 281-288.

Crisafulli, F. (1997). *Seismic Behaviour of Reinforced Concrete Structures with Masonry Infills*. PhD. University of Canterbury. Christchurch, New Zealand.

Curran, M. (2006). *Life Cycle Assessment: Principles and Practice*. Report No. EPA/600/R06/060, Cincinnati, Ohio. E-Journal.

db.world-housing.net, (2014). *World Housing Encyclopedia –WHE, A Resource on construction in Earthquake Regions*. [online]. Disponible en: <http://db.world-housing.net/>. [Acceso 28/12/2017].

Dimoudi, A., y Tompa, C. (2008). *Energy and Environmental Indicators Related to Construction of Office Buildings*. Resources, Conservation and Recycling, 53(1-2), pp. 86–95.

earth-auroville.com, (2017). *Auroville Earth Institute, UNESCO Chair Earthen Architecture*. Disponible en: <http://www.earth-auroville.com/>. [Acceso 28/12/2017].

Flores, L. (2008). *Comportamiento de Estructuras de Mampostería*. Presentación dentro del Curso de Edificaciones de Mampostería. Oaxaca, Oaxaca. Sociedad Mexicana de Ingeniería Estructural.

Flower, D. y Sanjayan, J. (2007). *Green House Gas Emissions due to Concrete Manufacture*, The International Journal of Life Cycle Assessment, 12(5), pp. 282–288.

Gao, Y., Ierapetritou, M., y Muzzio, F. (2013). *Determination of the Confidence Interval of the Relative Standard Deviation Using Convolution*. Springer Science and Business Media, New York, 8(2), pp. 72-82

Ghavani, K., Toledo, R. y Barbosa, N. (1999). *Behaviour of Composite Soil Reinforced With Natural Fibres*. Cement and Concrete Composites, 21(1), pp. 39-48

González, M. y García, J. (2006). *Assessment of the Decrease of CO₂ Emissions in the Construction Field Through the Selection of Materials: Practical Case Study of Three Houses of low Environmental Impact*. Building and Environment, 4(7), pp. 902–909.

Guerrero, L., Roux, R. y Soria, F. (2010). *Ventajas Constructivas del Uso de Tierra Comprimida y Estabilizada con Cal en México*. Palapa, Universidad de Colima, México, 10(5), pp. 45-57

Guetala, A., Abibsi, A. y Houari, H. (2006). *Durability Study of Stabilized Earth Concrete Under Both Laboratory and Climatic Conditions Exposure*. Construction and Building Materials, 20(3), pp. 119-127

Guillaud, H., Joffroy, H. y Odul, P. (1985). *Compressed Earth Blocks: Manual of Design and Construction*, Volume II. Deutsches Zentrum für Entwicklungstechnologien - GATE in: Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ), GmbH in coordination with BASIN.

Gustavsson, L. y Sathre, R. (2006). *Variability in Energy and Carbon Dioxide Balances of Wood and Concrete Building Materials*. Building and Environment, 41(7), pp. 940–951.

Hacker, J., De Saulles, T., Minson, A. y Holmes, M. (2008). *Embodied and Operational Carbon Dioxide Emissions From Housing: A Case Study on the Effects of Thermal Mass and Climate Change*. Energy and Buildings, 40(3), pp. 375–384.

Hanle, L., Jayaraman, K. y Smith, J. (2004). *CO₂ Emissions Profile of the U.S. Cement Industry*. 13th International Emission Inventory Conference Working for Clean Air, Clearwater, FL.

Hernández, F., y Usuga, O. (2011). *Análisis Bayesiano para la Distribución Log-normal Generalizada Aplicada a Modelos de Falla con Censura*. Revista Colombiana de Estadística, 34(1), pp. 95-109.

Houben, H. y Guillaud, H. (1994). *Earth Construction – A Comprehensive Guide*. ITDG Publishing, London, England.

Huberman, N. y Pearlmutter, D. (2004). *Life Cycle Energy Performance of Building Materials: Alternatives for a Desert Environment*. The 21st Conference on Passive and Low Energy Architecture, Netherlands.

Jönsson, A., Björklund, T. y Tillman, A. (1998). *Life Cycle Assessment of concrete and steel building frames*, The International Journal of Life Cycle Assessment, 3(4), pp. 216–224.

Khedari, J., Suttisonk, B., Pratinthong, N., y Hirunlabh, J. (2001). *New Lightweight Composite Construction Materials with Low Thermal Conductivity*. Cement and Concrete Composites, 23(1), pp.65-70.

Khedari, J., Watsanasathaporn, P., y Hirunlabh, P. (2005). *Development of Fibre-Based Soil-Cement Block With Low Thermal Conductivity*. Cement and Concrete Composites, 27(1), pp. 111-116.

Levine, M. Martin, N., Price, L. y Worrel, E. (1995). *Efficient Use of Energy Utilizing High Technology: An Assessment of Energy Use in Industrial and Buildings*. London: World Energy Council, 1995 Annual Report, pp.6.

Madhava, K., Venkatarama, B., y Jagadish, K. (1996). *Flexural Bond Strength of Masonry Using Various Blocks and Mortars*. Materials and Structures, 29(2), pp. 119-124.

McNary W., y Abrams, D. (1985). *Mechanics of Masonry in Compression*. Journal of Structural Engineering, 111(4), pp. 857-870.

Meli, R. (1973). *Behavior of Masonry Walls Under Lateral Loads*. Proceedings of the 5th World Conference on Earthquake Engineering. International Association for Earthquake Engineering, Rome, 5(1), pp. 853-862.

Meli, R., Brzev, S., Astroza, M., Boen, T., Crisafulli, F., Dai, J., Farsi, M., Hart, T., Mebarki, A., Moghadam, A., Quiun, D., Tomazevic, M., y Yamin, L. (2011). *Seismic Design Guide for Low-Rise Confined Masonry Buildings*. Earthquake Engineering Research Institute.

Mendoza, M., Roeder G. y Ayala A. (2004). *Verificación de la Capacidad de Muros de Mampostería Confinada ante Cargas Laterales*. Sociedad Mexicana de Ingeniería Estructural. XIV Congreso Nacional de Ingeniería Estructural, Acapulco, Gro.

Monahan, J. y Powell, J. (2011). *An Embodied Carbon and Energy Analysis of Modern Methods of Construction in Housing: A Case Study Using a Lifecycle Assessment Framework*. Building and Environment, 43(1), pp. 179–188.

NTC-M, (2004). *Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Estructuras de Mampostería*. Gaceta Oficial del Gobierno del Distrito Federal. Tomo 1, pp. 4-53.

NMX-C-404-ONNCCE, (2005). *Industria de la Construcción – Determinación de las Dimensiones de Ladrillos, Tabiques, Bloques y Tabicones para la Construcción*. Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, México.

Nordhaus, W. (1991). *A Sketch of the Economics of the Greenhouse Effect*. The American Economic Review, 81(2), pp. 146–150.

Nordhaus, W. y Yang, Z. (1996). *A Regional Dynamic General-Equilibrium Model of Alternative Climate-Change Strategies*. The American Economic Review, 86(4), pp. 741–765.

Pearce, D. (2003). *The Social Cost of Carbon and its Policy Implications*. Oxford Review of Economic Policy, 19(3), pp. 362–384.

Penttala, V. (1997). *Concrete and Sustainable Development*. American Concrete Institute Materials Journal, 94(5), pp. 409–416.

Pequeño Larousse ilustrado 2008.

Peters, C. (2001). *Statistics for Analysis of Experimental Data*. Environmental Engineering Processes Laboratory Manual. S. E. Powers, Ed. AESSP, Champaign, IL.

Ryan, C. (2011). *Traditional Construction for a Sustainable Future*. Spon Press, USA.

Tae, S., Baek, C., Shin, S. (2011). *Life Cycle CO₂ Evaluation on Reinforced Concrete Structures With High-Strength Concrete*. Environmental Impact Assessment Review, 31(3), pp. 253–260.

Tena, A. (2001). *Diseño de Estructuras de Mampostería*. Apuntes del curso dictado en la Maestría en Estructuras de la Universidad Autónoma Metropolitana y en el Posgrado de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma Metropolitana.

Tena, A. y Miranda, E. (1999). *Edificaciones de Mampostería para Vivienda*. Fundación ICA, Capítulo 4, pp. 73-84.

Tol, R. (2005). *The Marginal Damage Costs of Carbon Dioxide Emissions: An Assessment of Uncertainties*. Energy Policy, 33(16), pp. 2064–2074.

Tol, R. (2008). *The Social Cost of Carbon: Trends, Outliers and Catastrophes, Economics—the Open Access*. Open-Assessment E-Journal, 2(25), pp. 1-24

Tomazevic, M. (1999). *Earthquake-Resistant Design of Masonry Buildings*. Imperial College Press, London, U.K.

Vargas, A. (1995). *Estadística Descriptiva e Inferencial*. Ediciones de la Universidad de Castilla-La Mancha. 576 p.

Venkatarama, B. (2004). *Sustainable Building Technologies*. Current Science, 87(7), pp. 899-907.

Venkatarama, B. y Gupta, A. (2004). *Characteristics of Soil-Cement Blocks Using Highly Sandy Soils*. Materials and Structures, 38(6), pp. 651.

Venkatarama, B. y Gupta, A. (2006). *Tensile Bond Strength of Soil-Cement Block Masonry Couplets Using Cement-Soil Mortars*. Materials in Civil Engineering, 18(1), pp. 36-45.

Venkatarama, B., y Jagadish, K. (2003). *Embodied Energy of Common and Alternative Building Materials and Technologies*. Energy and Buildings, 35(2), pp. 129–137.

Venkatarama, B., Lal, R. y Nanjunda, K. (2007). *Enhancing Bond Strength and Characteristics of Soil-Cement Block Masonry*. Journal of Materials in Civil Engineering, ASCE, 19(2), pp. 164.

Venkatarama, B., Lal, R. y Nanjunda, K. (2007). *Optimum Soil Grading for the Soil-Cement Blocks*. Journal of materials in civil engineering, ASCE, 19(2).

Walker, P. (1999). *Bond Characteristics of Earth Block Masonry*. Journal of Materials in Civil Engineering, 11(3), pp. 249-256.

Walker, P. y Stace, T. (1997). *Properties of Some Cement Stabilized Compressed Earth Blocks and Mortars*. Materials and Structures, 30(9), pp. 545-551.

Worrell, E., Pryce, L., Martin, N., Hendriks, C. y Ozawa, L. (2001). *Carbon Dioxide Emissions from the Global Cement Industry*. Annual Review of Energy and the Environment, 26(1), pp. 303-329.

Yan, H., Shen, Q., Fan, L., Wang, Y. y Zhang, L. (2010). *Greenhouse Gas Emissions in Building Construction: A Case Study of One Peking in Hong Kong*. Building and Environment, 45(4), pp. 949–955.

Zabalza, I., Valero, A., y Aranda, A. (2011). *Life Cycle Assessment of Building Materials: Comparative Analysis of Energy and Environmental Impacts and Evaluation of the Eco-Efficiency Improvement Potential*. Building and Environment, 46(5), pp. 1133–1140.

Zuñiga, O. y Teran, A. (2008). *Evaluación Basada en Desplazamientos de Edificaciones de Mampostería Confinada*. Revista de Ingeniería Sísmica No. 79. 25-48. Sociedad Mexicana de Ingeniería Sísmica, 79, pp. 25-48.